E 260

MÉMOIRES

DU

MUSÉUM NATIONAL

D'HISTOIRE NATURELLE

NOUVELLE SÉRIE

Série C, Sciences de la Terre

TOME XIX

FASCICULE 3 ET DERNIER

G. BUSSON

LA SÉDIMENTATION DES ÉVAPORITES

COMPARAISON DES DONNÉES SAHARIENNES A QUELQUES THÉORIES, HYPOTHÈSES ET OBSERVATIONS CLASSIQUES OU NOUVELLES

PARIS

ÉDITIONS DU MUSÉUM

38, rue Geoffroy-Saint-Hilaire (V^e^)

1968

MUSEUM D'HIST. NATUR.

Source . MNHN, Paris

Source MNHN, Paris

MÉMOIRES DU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
Série C, Sciences de la Terre, Tome XIX, Fasc. 3 et dernier

LA SÉDIMENTATION DES ÉVAPORITES

Comparaison des données sahariennes à quelques théories, hypothèses et observations classiques ou nouvelles

par

Georges BUSSON *

SOMMAIRE

A. INTRODUCTION :

Les données du bassin mésozoïque saharien; leur intérêt et leurs lacunes 128

B. ORIGINE CONTINENTALE ET ORIGINE OCÉANIQUE DES ÉVAPORITES; FACIÈS DÉSERTIQUE 129

1. La naissance des évaporites en milieu continental; les théories « désertiques » 129
2. La naissance des évaporites liée au domaine océanique 134

a. *Lagunes et faciès lagunaires* 134
b. *Faciès désertique et aridité* 135

C. PRÉCIPITATION DES ÉVAPORITES EN IMPRÉGNATION INTERSTITIELLE OU EN SÉDIMENTS SUBAQUATIQUES 136

D. LES ÉVAPORITES, DÉPÔTS LES MOINS PROFONDS DE LA SÉRIE SÉDIMENTAIRE MARINE 137

Régression et faciès salifères 139

E. LA THÉORIE DE LA BARRE 141

F. LES ÉVAPORITES, DÉPÔTS PROFONDS 144

1. Les observations faites dans les séries géologiques 144

a. *La disposition des faciès en rapport avec les différences de subsidence.* 144

1. Les exemples sahariens 145
2. Rappel de dispositifs analogues extra-sahariens 148

b. *Sédimentation saline et vitesse de subsidence* 151

2. Les observations faites dans la nature actuelle et les hypothèses explicatives 153

a. *Les hypothèses théoriques et les constatations expérimentales* 153
b. *Les observations faites dans la nature actuelle* 154

1. Les saumures profondes de la mer Rouge 154
2. Les enseignements de la mer Morte 155
3. Conclusions 159

* Laboratoire de Géologie du Muséum national d'Histoire naturelle.

8 564026 6

BIBL. DU MUSEUM D'HIST. NATUR.

Source : MNHN, Paris

G. ESSAI DE SYNTHÈSE DE CES DONNÉES 159

1. L'indifférence bathymétrique 159
2. Le rôle des facteurs tectoniques 159
3. Évocation de quelques classifications structurales des cisements évaporitiques 160
4. Les conditions climatiques de la sédimentation évaporitique 161
5. Les conditions liées à la morphologie du plancher sédimentaire et à la subsidence 161

a. *Observations préliminaires* 161

1. Le domaine saharien, plate-forme particulièrement typique 161
2. Les facteurs dynamiques du confinement 162

b. *Le confinement sur la plate-forme saharienne* 163

1. Le confinement par subsidence différentielle 163
2. Le confinement sans subsidence différentielle prononcée 163

L'intervalle B. *a*2 164
La carte du Lias-Dogger inférieur 164

3. Conclusions 165

H. CONCLUSIONS GÉNÉRALES 165

I. BIBLIOGRAPHIE 167

Source MNHN, Paris

AVANT-PROPOS

Ce bref mémoire constitue un essai pour exposer l'apport des données du Mésozoïque saharien aux problèmes de la sédimentation des évaporites. Les terrains de l'ère secondaire sur la plate-forme saharienne sont en effet d'une richesse extraordinaire en sédiments évaporitiques : au Trias, au Lias et au Jurassique moyen, enfin au Crétacé supérieur (Sénonien en particulier), le sel gemme, l'anhydrite ou le gypse se sont étalés sur des centaines de milliers de kilomètres carrés et sur des épaisseurs dépassant parfois le kilomètre. De nombreuses théories, hypothèses et observations classiques ou nouvelles concernant la sédimentation des évaporites seront rappelées ci-dessous, plus ou moins brièvement; ceci dans le dessein de les confronter avec les enseignements de ces évaporites du Secondaire saharien. Quant au Secondaire saharien lui-même, il est évident qu'il ne pouvait être envisagé d'en donner ici une description, même brève. Seuls quelques traits importants et significatifs dans le domaine de la genèse des évaporites seront exposés dans ce texte. Ces traits sont tirés de la documentation assez abondante dont j'ai entrepris la publication et qui concerne à la fois le Sahara algérien (G. Busson, 1964), l'Extrême-Sud tunisien (1967) et la synthèse d'ensemble des données de sondages (à paraître en 1969). Le lecteur pourra se reporter à ces publications pour obtenir plus de détails sur les exemples cités ou éventuellement pour mieux les situer dans leur contexte stratigraphique et paléogéographique.

J'exprime mes remerciements à MM. les professeurs R. Laffitte et G. Lucas qui ont bien voulu lire le manuscrit de ce texte et m'ont apporté de nombreuses suggestions.

Source : MNHN, Paris

A. INTRODUCTION. — LES DONNÉES DU BASSIN MÉSOZOÏQUE SAHARIEN : LEUR INTÉRÊT ET LEURS LACUNES

L'intérêt des données du bassin mésozoïque saharien pour l'étude des évaporites prend sa source dans deux faits principaux : d'une part, la taille prodigieuse des accumulations évaporitiques dont ce bassin a été le siège; d'autre part, l'absence de déformations importantes ayant affecté le matériel salifère, grâce à laquelle se trouvent respectés l'ordre et la disposition mutuelle des dépôts originels. En ce qui concerne la taille, je rappellerai que le bassin salifère triasique et liasique saharien est du même ordre de grandeur que le bassin salifère du Zechstein anglo-allemand. Avec ses annexes de Berbérie, le Salifère d'Afrique du Nord-Ouest pourrait représenter l'accumulation quantitativement la plus importante de sulfates et de chlorures du monde entier. Quant à l'absence de déformations importantes, elle est tout à fait remarquable. Il a fallu l'extrême rigidité de la plate-forme saharienne pour qu'une telle masse salifère et argilo-salifère dont l'épaisseur est comprise entre 1 000 et 2 000 m et la profondeur d'enfouissement entre 2 000 et 4 000 m, ne donne pas lieu aux habituels phénomènes halocinétiques : non seulement, il ne semble pas exister de dômes de sel sur la plate-forme saharienne, mais, en outre, les pendages qui affectent ces niveaux salifères ont le plus souvent des valeurs qui ne sont que de l'ordre de la fraction de degré. Or, la portée d'un pareil fait est inestimable : toute reconstitution hypothétique de la forme du bassin — obligatoire quand les sels ont flué —, peut être ici éliminée. Aucun *seuil* ne pourra être créé pour séparer tel ou tel dépôt, dès lors que la disposition observable n'en manifeste point la moindre trace. Les différents faciès se trouvent exactement dans les conditions de succession et de coexistence latérale qui ont été celles de leur dépôt. Enfin, les lessivages et les remplacements métasomatiques dont l'importance est souvent considérable[1] sont ici réduits au minimum, puisque ce sont toujours les déformations tectoniques qui frayent une voie aux solutions responsables de ces lessivages et permettent les mouvements et les remaniements auxquels ces solutions donnent lieu.

Mais les données de ce Salifère saharien ont aussi leurs lacunes, qui sont loin d'être négligeables. C'est essentiellement l'absence de renseignements précis sur le stock minéral, aussi bien des évaporites elles-mêmes que des argiles interstratifiées. On connaît mal souvent la nature exacte des sels traversés ; et *a fortiori* l'on ignore tout de la proportion de différents constituants éventuels à un même niveau, en l'absence de toute analyse quantitative. A ma connaissance, une seule prospection a été effectuée dans l'intention de préciser la nature de ce stock minéral : il s'agit d'une opération gamma-ray enregistrée dans ces conditions particulières (faible vitesse de remontée, caractéristiques chimiques particulières de la boue) en vue de déceler dans un puits d'Hassi-Messaoud la présence éventuelle de potasse au sein du sel gemme sénonien. Le résultat a d'ailleurs été négatif. On sait que l'exploitation des gamma-ray enregistrés normalement dans les puits pétroliers sahariens ne permet pas de se prononcer sur la présence de sels potassiques.

---

1. H. Bouchert (1965) en particulier, a étudié ces mécanismes de lessivage sous l'action d'eaux d'origine externe, percolant à travers les zones de fracture, et d'eaux d'origine interne, libérées principalement par la conversion du gypse en anhydrite. Sans vouloir traiter de ces phénomènes, je rappelle que cet auteur tend à imputer le mode de gisement des sels les plus solubles (sels de potassium en particulier) à un réarrangement dû à des lessivages et des dépôts largement postérieurs à la sédimentation. Davantage, il interprète comme une conséquence de ces remplacements métasomatiques, les « *uplift facies* » ou « *anticline facies* » d'une part et les « *basin* » ou « *syncline facies* » d'autre part : c'est-à-dire que la localisation des sels les moins solubles (calcaire, dolomie, gypse et anhydrite) sur les zones hautes et des sels les plus solubles dans les zones subsidentes n'est pas due, d'après H. Bouchert, à une précipitation primaire. En fait, suivant cet auteur, les zones hautes étant les plus riches en fractures sont parcourues préférentiellement par les eaux souterraines et les sels les plus solubles s'y trouvent dissous et lessivés plus vite qu'ailleurs... Le domaine saharien avec sa rigidité et son étanchéité évite d'avoir à faire une part trop grande à ces phénomènes complexes.

Source : MNHN, Paris

Les deux seuls précipités signalés sur les logs sont l'anhydrite et le sel gemme. Or il paraît peu vraisemblable qu'un bassin salifère aussi vaste ait pris naissance sans qu'apparaissent jamais d'autres sulfates et d'autres chlorures : il est probable que c'est aux méthodes d'études que sont à imputer ces *lacunes* de constituants, secondaires quantitativement mais si importants pour préciser l'histoire du bassin. Il suffit d'évoquer les études et les reconstitutions minutieuses menées sur les différents sels du Zechstein européen pour mesurer la perte que représente pour nos connaissances notre ignorance totale au sujet de ces constituants. Dans le même ordre d'idée, il est évident qu'on ne peut pas même envisager d'entreprendre ici des études physico-chimiques du genre de celles menées ailleurs (O. Braitsch, 1962), ayant pour but par exemple de préciser la température des précipitations primaires, soit à partir du rapport kieserite-carnallite, soit à partir de la teneur en brome de la sylvine et du sel gemme[1].

B. ORIGINE CONTINENTALE ET ORIGINE OCÉANIQUE DES ÉVAPORITES : FACIÈS DÉSERTIQUE.

La genèse des évaporites est encore si mal connue que l'accord n'est même pas encore entièrement réalisé sur le milieu, marin ou continental, dans lequel ces dépôts ont pris naissance. Je rappellerai les grandes lignes de la discussion qui opposent les tenants de ces hypothèses différentes; puis, je montrerai l'apport des donnécs du Mésozoïque saharien à ce problème.

1. *La naissance des évaporites en milieu continental.*

C'est le désir parfaitement légitime d'expliquer le passé par la considération du présent qui est à l'origine de l'hypothèse d'une genèse continentale des évaporites. Il est certain que, dans la nature actuelle, le dépôt d'évaporites — phénomène d'une grande rareté, ou du moins d'une ampleur toujours très limitée — se produit surtout dans des dépressions continentales (lac salé, chott ou mieux sebkha[2], playa et salina, etc.).

D'où, en particulier, la « théorie désertique » due à J. Walther (1900-1924) et que J. Ricour (1964, p. 7) résume brièvement de la manière suivante : « les gisements salins se sont formés en milieu strictement continental, dans des bassins endoréiques où les eaux des fleuves faiblement salées, se seraient accumulées pendant de longues périodes ». Les critiques n'ont pas manqué contre ces théories continentales et désertiques des évaporites : néanmoins, ces mêmes théories réspparaissent périodiquement dans la littérature, relancées par l'observation, dans les contrées arides, de tel ou tel phénomène superficiel. Je pense par exemple à la note relativement récente de P. Bellair (1954) selon laquelle « certaines formations anciennes de gypse doivent provenir du remaniement d'une croûte gypso-siliceuse formée *per ascensum* en climat aride et non par évaporation dans des lagunes »... Ou encore B. Dussart (1963, p. 57) : « Le transport des éléments générateurs d'évaporites par les eaux continentales doit donc être considéré aussi sérieusement que celui par les eaux marines ».

---

1. Je crois bon néanmoins de rappeler — pour ne pas noircir le tableau outre mesure... — que l'halite forme statistiquement 95 % des dépôts de chlorures et l'anhydrite, avec le gypse, l'essentiel des sulfates : si les données utilisées dans cette synthèse — qui ne mentionnent qu'halite et anhydrite — sont approximatives, elles ne sont donc pas radicalement fausses.

2. Il faut substituer *sebkha* à *chott*, car, ainsi que me l'a rappelé R. Laffitte, *chott* désigne seulement le rivage ou la plage, et non l'étendue périodiquement inondée qui est appelée, en arabe, la *sebkha* : confusion créée par les cartes topographiques et géographiques d'Afrique du Nord et facilement explicable.

Source : MNHN, Paris

En fait, bien des objections surgissent contre cette assimilation de grands gisements évaporitiques du passé aux dépôts des cuvettes continentales aursalées de la nature actuelle. Les *quantités* prodigieuses de sels accumulées dans certains gisements ne sauraient s'accommoder que d'une source océanique. Même en voulant faire jouer un rôle essentiel au facteur « temps », pour expliquer les quantités totalisées, il demeure une *différence qualitative* irréductible. En effet, toutes les observations montrent que « les éléments qui rendent compte de la *composition moyenne de la croûte terrestre* et de la *minéralisation*, d'ailleurs faible, *des eaux fluviales, sont surtout des carbonates* »... (P. TCHERNIA, 1959, p. 422). Or, les dépôts évaporitiques consistent essentiellement en chlorures et en sulfates, lesquels sont précisément les sels dominants de la masse océanique. Il n'est pas jusqu'à l'ordre de précipitation lui-même qui rappelle, dans beaucoup de gisements, celui d'une solution marine; alors que les dépôts continentaux sont surtout fonction de la nature des affleurements du bassin-versant exposés à l'érosion.

En réalité, les évaporites des dépressions continentales relèvent d'un simple recyclage : les sels amenés à l'affleurement, dans un bassin versant endoréique, sont dissous et entraînés par l'eau et ils se redéposent, en l'absence d'un drainage suffisant, au fond de la dépression — où s'évapore l'eau qui les a véhiculés. C'est en somme un cas typique de remaniement. Or, il est évident que l'on ne peut expliquer l'origine d'une accumulation par les processus qui triturent et remanient superficiellement sous nos yeux cette accumulation. Le problème posé n'est pas sans analogie avec celui des *couches rouges* : bien des auteurs, en effet, après de nombreuses considérations sur des couches rouges qu'ils étudient, finissent par conclure... qu'elles sont un héritage de couches rouges voisines et plus anciennes. L'explication proposée est certainement exacte, mais d'un intérêt génétique assez faible.

Les données du bassin mésozoïque saharien s'opposent radicalement à l'hypothèse d'une origine continentale des évaporites qui sont présentes dans ce bassin avec une si grande abondance. Il y a d'abord la quantité des sels observés qui est littéralement prodigieuse. Considérons seulement le domaine géographique limité au Nord par la région d'Oum el Adam (Lg 1), à l'Est par la Djeffara et considérons, dans la série mésozoïque, l'intervalle stratigraphique couvrant le Trias supérieur et probablement une partie du Lias que j'ai appelé Salifère principal (G. BUSSON, sous presse). Par un dépouillement systématique des logs et des diagraphies des forages exécutés sur 600 000 km², j'ai calculé, pour chaque puits, l'épaisseur cumulée respectivement de sel et d'anhydrite. Ces valeurs m'ont permis d'établir des cartes *isolithes*, qui consistent en courbes d'égale épaisseur cumulée d'un certain composant lithologique. Les figures 1 et 2 représentent respectivement les cartes isolithes du sel et de l'anhydrite du Salifère principal. Il est relativement aisé de passer de ces cartes à une estimation du cubage global du composant correspondant. Sans entrer le moins du monde dans le détail des calculs, je me contenterai de fournir les résultats approximatifs : dans le Salifère principal, le sel gemme représente un volume dont l'ordre de grandeur est de 100 000 km³ [1]; quant à l'anhydrite, le volume serait de près de 25 000 km³. Il est évident qu'il s'agit là d'estimation par défaut. En effet, la sédimentation saline ne se limitait ni à la latitude de Lg 1 vers le Nord, ni à la Djeffara vers l'Est : vers le Nord, tous les diapirs de Berbérie prouvent à l'évidence l'extension à un immense domaine de la même sédimentation à la même époque; au-delà de la Djeffara, les découvertes — encore inédites, je crois — de sel triasique stratifié dans la région de Ben Gardane et peut-être même de diapir salifère triasique dans le golfe de Gabès, établissent la prolongation de ce bassin évaporitique loin vers l'Est. De toute façon, les quantités avancées ci-dessus sont déjà démesurées et il me paraît évident que le milieu océanique représente la seule source de sels capable de les avoir alimentées. L'origine continentale est d'autant plus à exclure que l'on constate une absence quasi totale de ces sels dans le matériel des bassins-versants

1. Cette quantité est à comparer aux 22 millions de kilomètres cubes actuellement dissous dans la masse océanique. Le Salifère principal (Trias + Lias *p.p.*) saharien du seul domaine reconnu par les sondages d'exploration pétrolière a donc soustrait une quantité de sel, dont l'ordre de grandeur par rapport à la totalité des sels océaniques actuels est du 1/200. Il est malheureusement difficile d'estimer à combien s'élève cette quantité si l'on tient compte, en outre, des sels des terrains triasiques voisins du pourtour occidental de la Mésogée (Berbérie, Espagne, Bassin germanique, etc.).

Source : MNHN, Paris

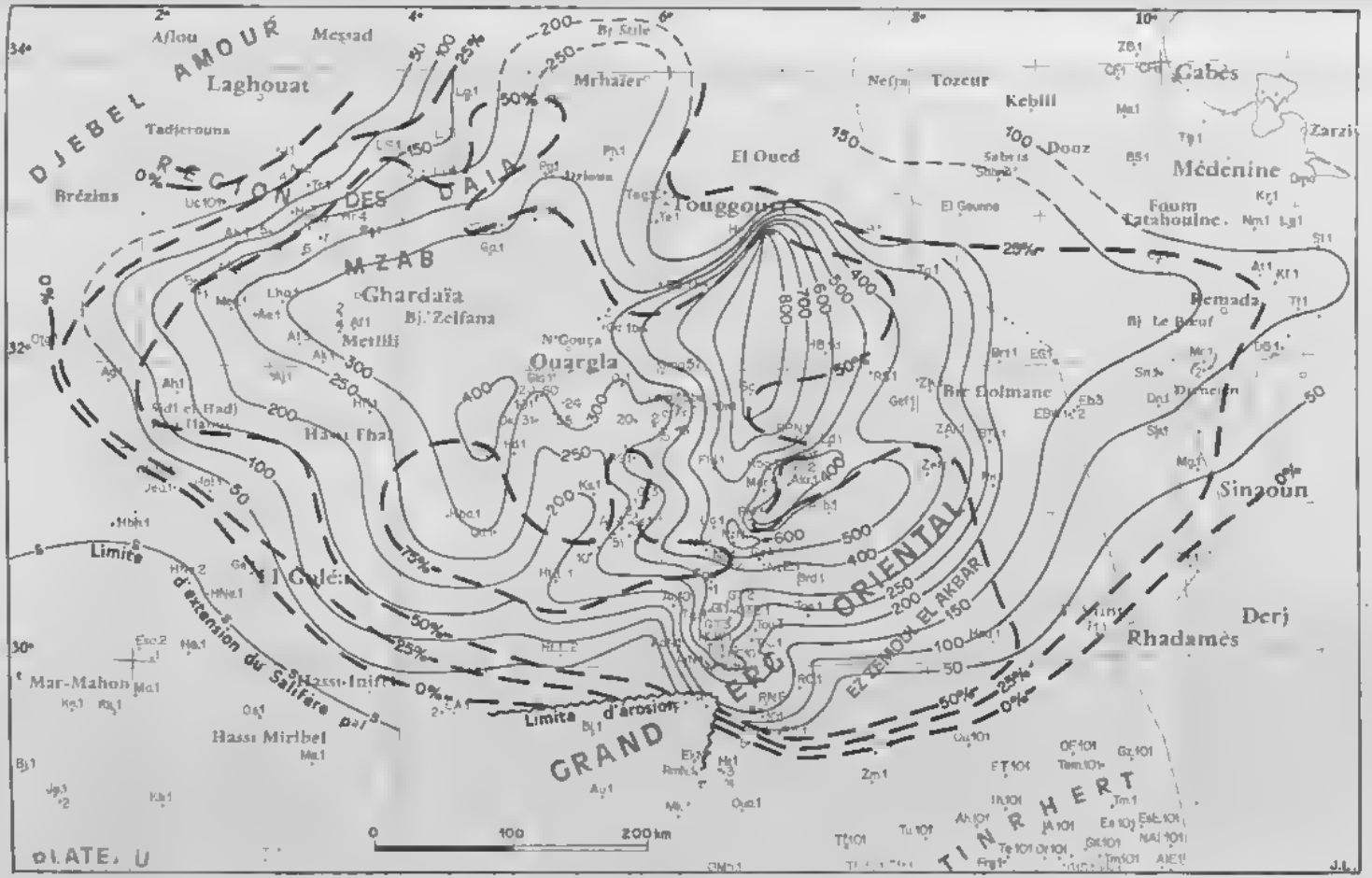


FIG. 1. — Carte du Sel du Salifère principal (Trias supérieur et Lias *p.p.*)

Les courbes dessinées en traits fins et continus correspondent à des isolithes : elles fournissent en chaque point *l'épaisseur cumulée en mètres du sel gemme présent au sein du Salifère principal.* Les courbes épaisses, en trait interrompu, sont des valeurs d'isopourcentages : pourcentage de l'épaisseur totale du Salifère principal que représente la seule épaisseur cumulée de sel gemme.

L'épaisseur de sel gemme pur est prodigieuse : plusieurs centaines de mètres en général, près d'un kilomètre dans la partie centrale. Sans entrer dans le détail des calculs, on conçoit qu'une telle carte permette d'estimer le cubage global du sel gemme de la formation considérée : celui-ci serait de l'ordre de 100 000 km³, pour le domaine ici cartographié.

Source : MNHN, Paris

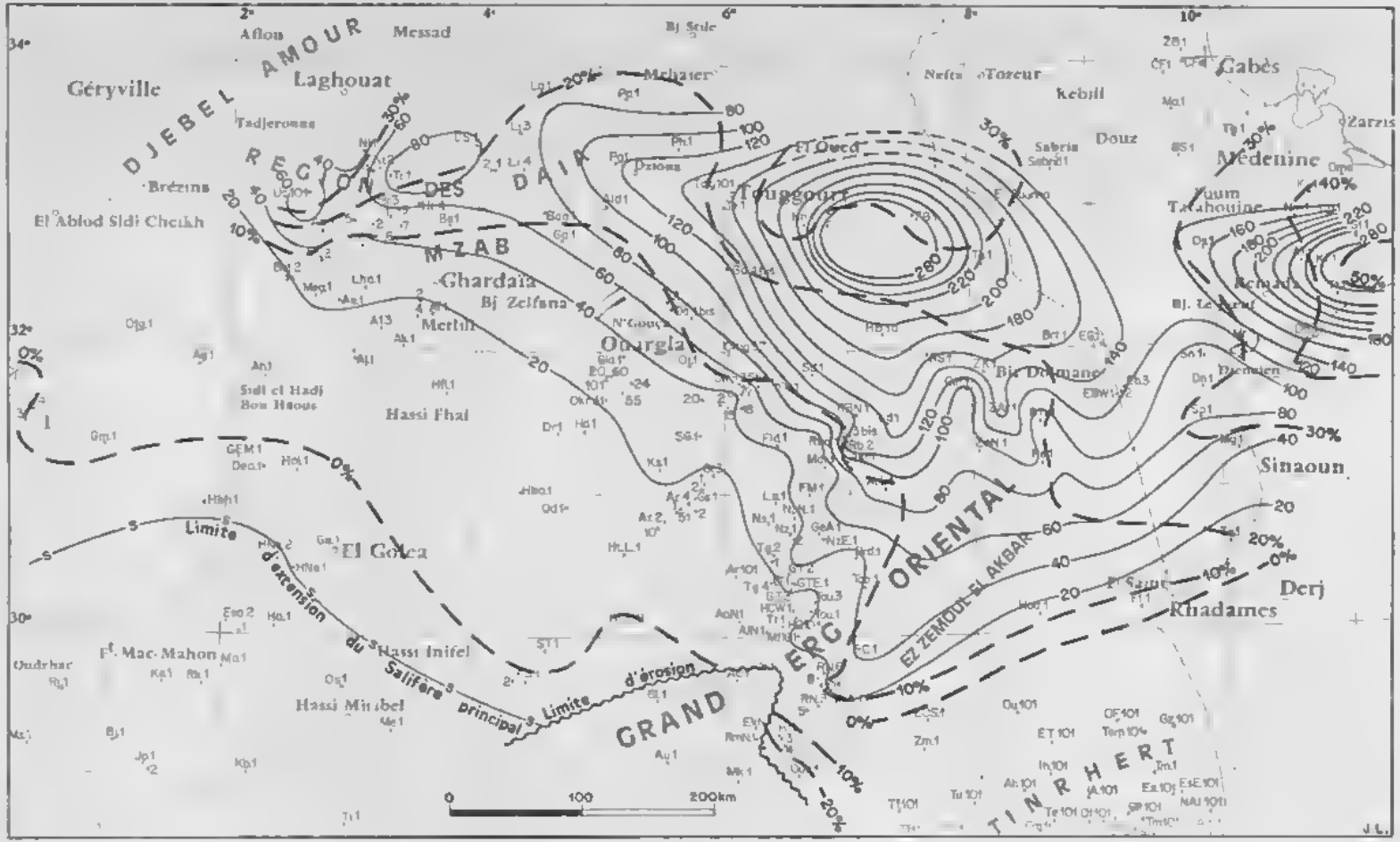


FIG. 2. — Carte de l'anhydrite du Salifère principal (Trias supérieur et Lias *p.p.*)

On retrouve ici en traits fins les courbes isolithes (épaisseur cumulée en mètres de l'anhydrite au sein du Salifère principal) et les courbes d'isopourcentages du même minéral, rapporté à l'épaisseur de l'ensemble de l'intervalle.

Source : MNHN, Paris

supposés (Paléozoïque surtout, Précambrien). Les relations évidentes et la coexistence des faciès salifères avec des dépôts marins en direction de la Mésogée fournissent des arguments supplémentaires en faveur d'une origine purement océanique.

Ainsi, de tous côtés, *les arguments abondent pour rejeter la théorie de l'origine continentale des grands gisements d'évaporites.* Avant de terminer l'examen de cette notion, je présenterai encore deux remarques :

1° Dans la théorie de J. WALTHER, il y a plus d'observations et d'interprétations intéressantes que ne le donnent à penser les critiques qui lui sont faites. Car à côté du « milieu de dépôt désertique », J. WALTHER a abordé le problème de la profondeur de dépôt des évaporites. C'est-à-dire qu'il a cherché à échapper à la contradiction qui surgit inévitablement dans ce domaine. D'un côté, en effet, il semble difficile de supposer que le milieu d'*évaporation* soit profond ; d'un autre côté la disposition des différents sels et l'épaisseur de leur accumulation respective, dans beaucoup de bassins, suggèrent que les composés les plus solubles se sont déposés dans les parties les plus profondes (voir ci-dessous : l'interprétation bathymétrique des évaporites). J. WALTHER n'a sans doute pas entièrement résolu ce problème ; il n'est pas sûr que l'on ait mieux réussi depuis.

2° Soulignons pour terminer que, dans le cas de gisements évaporitiques limités, la théorie continentale réapparaît étayée par les résultats et les chiffres fournis par l'arsenal des méthodes les plus modernes : teneurs en bore, composition isotopique ($^{18}O/^{16}O$, $^{13}C/^{12}C$, $^{34}S/^{32}S$). Je n'en veux pour exemple que le cas du gypse oligocène du bassin de Paris, à propos duquel j'évoquerai brièvement quelques-unes des interprétations données. J. C. FONTES (1968) vient de rappeler que les hypothèses marines et continentales — ou lacustres — datent toutes deux de près de deux siècles (1780, 1782). A la suite des travaux de M. DIEULAFAIT, l'hypothèse marine a prévalu un certain temps (M. MUNIER-CHALMAS, E. HAUG). Mais Ch. FINATON, en 1934, a relancé l'hypothèse d'une origine lacustre avec de nombreux arguments. Cet auteur notait l'absence complète du cortège d'éléments chimiques que l'on devrait trouver avec un gypse marin : sel gemme [1], qui se dépose avec des concentrations voisines de celles nécessaires à la précipitation du gypse ; célestite qui devrait cristalliser en même temps que le gypse ; enfin, absence de calcaire puisqu'il n'y a pratiquement pas la moindre intercalation marneuse au sein du gypse, même quand celui-ci atteint une puissance de 22 m. Ch. FINATON rappelait aussi que la solubilité du sulfate de chaux est plus de trois fois plus faible dans l'eau douce que dans l'eau de mer : observation en faveur d'un dépôt en eau douce. Et finalement l'auteur s'orientait vers un gisement de remaniement tout à fait caractérisé, suggérant que le gypse parisien représenterait un gîte de remaniement de l'anhydrite et du gypse keupériens, au sein d'un milieu lacustre. Depuis que Ch. FINATON a publié ses travaux, bien des auteurs ont réfuté la thèse d'une origine continentale, précisant parfois jusque dans le détail les modalités des apports marins qui rendraient compte de ces accumulations de gypse (G. DEICHA, 1942, par exemple).

Or cette genèse continentale vient d'être réaffirmée, avec force, par des auteurs qui s'appuient en particulier sur la composition isotopique de l'oxygène des carbonates et de l'eau de cristallisation des gypses (J.C. FONTES, R. CONFIANTINI et E. TONGIORGIE, 1963). Récemment, d'autre part, un auteur a fait appel aux processus bactériens pour rendre plus plausible cette origine dulcaquicole (A. VINOT, 1965). Sans prendre parti le moins du monde sur le problème de l'origine du gypse du bassin de Paris, j'ai tenu à rappeler ces hypothèses pour souligner combien sont encore souvent mal connues les conditions de formation des évaporites.

Par ailleurs, un fait m'a paru particulièrement frappant à la lecture de l'historique très complet que J.C. FONTES vient de donner de cette question : c'est l'alternance constante, pendant près de deux siècles, des hypothèses marines et continentales, plus de vingt fois reprises et rejetées l'une comme l'autre et parfois simultanément : pendant tout ce temps, les tenants des deux hypothèses se sont affrontés sans réussir à imposer leur point de vue. On peut penser

1. En fait, il a été trouvé dans le gypse des trémies qui témoignent de l'existence de traces de sel gemme à l'origine.

Source : MNHN, Paris

que si les conditions paléogéographiques de dépôt avaient été réellement analogues à un des environnements de la nature actuelle — en général si tranchées et si caractéristiques — l'accord se serait fait depuis longtemps... Parmi les qualificatifs qui reviennent souvent dans la description des milieux de dépôts successifs des différents termes de la coupe, on trouve par exemple laguno-saumâtre, lagunaire d'évaporation, laguno-lacustre, laguno-marin : et l'on peut penser que ces mots composés ne sont pas seulement destinés à apporter une précision, mais visent à évoquer un *milieu intermédiaire* entre ceux existants dans la nature actuelle, parce que l'équivalent strict semble bien ne pas pouvoir y être trouvé.

Une dernière observation va dans le même sens. Ces dernières années, il semble que les arguments deviennent plus nombreux en faveur d'un *milieu de dépôt sous-salé*. Mais il paraît difficile de s'expliquer les modalités de dépôt dans cette hypothèse : je n'en veux pour preuve que les formules tout à fait vagues par lesquelles se trouve qualifié, dans cette hypothèse (J.C. FONTES, 1968), le milieu de dépôt : dépôt « contrôlé par l'eau d'origine continentale », système deltaïque ou estuarien; deux termes qui évoquent encore un milieu *à la limite* du domaine marin et continental. Constatons une fois de plus que la différence si tranchée qui sépare le milieu marin du milieu continental dans la nature actuelle semble s'estomper considérablement — sinon disparaître — dans les séries du passé : signe irréfutable d'un aspect géographique profondément différent.

2. *La naissance des évaporites liée au domaine océanique.*

A vrai dire l'origine océanique des *grands* gisements évaporitiques est une idée ancienne et bien des géologues y ont toujours souscrit malgré J. WALTHER et M. GIGNOUX, et avant que N.M. STRAKHOV, A.I. DZENS-LITOVSKIJ ou L.L. SLOSS aient apporté à cette idée la consécration de leur approbation... Depuis les publications de M. DIEULAFAIT au siècle dernier jusqu'aux manuels et traités aussi classiques que ceux de L. DE LAUNAY (1913) ou de P. FOURMARIER (1949), il ne semble pas que la notion de cette liaison génétique entre le milieu marin et les grands gisements évaporitiques aient jamais été perdue de vue. Néanmoins, dans une partie de la littérature française, la redécouverte de cette notion, il y a quelques années, s'est accompagnée de jugements et de critiques dont certains justifient peut-être une rapide mise au point.

a. LAGUNES ET FACIÈS LAGUNAIRES.

On sait que, récemment, des auteurs (J. RICOUR, R. BROUSSE) se sont élevés contre l'emploi de l'épithète lagunaire à propos de dépôts évaporitiques. Ceci pour la raison qu'une lagune ne désigne pas spécialement un milieu sursalé. Comme l'écrit R. BROUSSE : « Sous nos climats, les lagunes, telles que celles du Languedoc, sont des milieux où la concentration de sels est inférieure à celle de l'eau de mer et où il ne saurait y avoir par conséquent de dépôts salins, en dehors de faibles dépôts locaux et temporaires (R. BROUSSE *in* J. AUBOUIN, 1968, p. 354). En réalité, l'objection ne me paraît pas suffisamment fondée. *L'emploi déjà ancien du terme « lagune »* [1] *voulait évoquer ce domaine particulier qui, tout en dépendant de la mer et en tirant d'elle une partie de sa substance, s'en distingue par un certain nombre de caractéristiques;* en particulier un isolement relatif ou quasi total. C'est-à-dire que l'emploi du terme « lagune », à propos de bassin de sédimentation évaporitique, visait à souligner l'origine océanique des sels, bien avant que cette notion ait été redécouverte. Et l'on peut penser que les critiques visant ce terme sont d'autant moins justifiées qu'elles émanent de ceux-là même qui s'attribuent la paternité de la renaissance de cette idée d'une origine marine... Certes, il n'est pas douteux que les lagunes les plus classiques — que ce soient celles du Languedoc ou celle de Venise, celles de la Baltique ou celles de la mer Noire — ne sont pas sursalées, mais dessalées. Il faut en voir la raison dans le fait bien simple que le monde actuel, et

1. R. LAFFITTE me fait remarquer que lagune est un terme emprunté à l'italien — plus précisément au vénitien — qui sert à désigner une étendue d'eau voisine de la mer et qui n'est pas encore la mer. C'est un terme orographique qui n'implique pas de salure et MUNIER-CHALMAS distinguait déjà le laguno-marin du laguno-lacustre; c'est-à-dire du sursalé lagunaire, d'un sous-salé également lagunaire.

Source : MNHN, Paris

spécialement nos régions, sont éminemment défavorables aux dépôts d'évaporites. Le corollaire de cette observation, c'est qu'il n'existe pas de mot, dans nos langues européennes, pour désigner une lagune naturelle sursalée. Quant aux « dépôts irréversibles de limons et de vases » (R. BROUSSE, 1968, p. 355) qui caractériseraient les milieux lagunaires et les opposeraient irréductiblement aux successions évaporitiques, leur raison d'être est évidemment la même ; elle réside dans l'humidité du climat qui favorise, en nos régions, les apports argileux, tout en mettant obstacle à l'enrichissement en sels. Mais il suffit d'imaginer des conditions d'aridité excessive pour que les mêmes lagunes deviennent le siège de dépôts salins.

D'ailleurs, lorsqu'une dépendance du domaine marin se présente, non plus dans nos régions humides, mais en pays aride, on constate deux faits ; premièrement, elle est sursalée; deuxièmement, le terme géographique qui lui est appliqué est encore fréquemment celui de lagune ou *laguna* ou *lagoon*.

En conclusion, si l'adjectif lagunaire n'est pas d'une grande précision, il ne me paraît pas cependant souhaitable de l'éliminer radicalement lorsque l'on évoque le milieu de dépôt de ces évaporites marines anciennes. Quant au substantif lagune, je le crois assuré d'une longue vie dans le même emploi; car il me paraît correspondre assez exactement — avec plus de légèreté — à la circonlocution que lui préfère R. BROUSSE de « portions de mer à précipitation saline », étant entendu que lesdites lagunes se placent dans un contexte géographique d'hyper-aridité, indispensable de l'avis de tous les auteurs pour obtenir le dépôt de sels.

b. FACIÈS DÉSERTIQUES ET ARIDITÉ.

L'ardeur de la discussion engagée contre les « théories désertiques » ne doit pas faire oublier, en effet, qu'une extrême aridité est une condition pratiquement sine qua non *des dépôts d'évaporites.* Or, le lien entre ces deux phénomènes semble parfois être un peu perdu de vue. R. BROUSSE dans son manuel récent (*in* J. AUBOIN, 1968), qui synthétise de nombreuses idées modernes, écrit par exemple (p. 364) : « Jusqu'à ces dernières années, la présence des roches salines avait la valeur d'un label de qualité des faciès d'évaporation. En fait, cette notion est sujette à caution *car les roches salines, nées dans les milieux euxiniques, échappent à cette impérieuse qualité climatique* ». Si l'auteur fait allusion aux roches salines anciennes, rien, dans la présence de faciès euxiniques, ne permet d'affirmer l'existence d'un climat non aride. Si l'auteur se fonde sur des dépôts salins actuels *liés à des milieux euxiniques en climat humide*, on peut regretter qu'il ne fournisse pas d'autres détails, car, à ma connaissance, rien n'a été publié à ce sujet qui concerne autre chose que des dépôts littéralement microscopiques, comparés aux grands gisements évaporitiques du passé.

En fait, l'accord semble régner sur la nécessité de climats arides pour qu'il y ait dépôt d'évaporites et il ne serait pas justifié de remettre en cause cette notion en l'absence d'arguments nouveaux parfaitement démonstratifs [1]. En effet, la plupart des auteurs qui ont examiné les conditions de genèse des grands gisements évaporitiques du passé (P.C. SCRUTON, F.H. STEWART, J. RICOUR, etc.), ont insisté sur ce qui est la condition *sine qua non* pour créer de tels dépôts : il faut que l'évaporation locale soit supérieure à la somme des précipitations et des apports par ruissellement. L'exemple de la mer Morte et des fluctuations de ses dépôts sédimentaires dans un passé ancien et récent viennent d'être très minutieusement décrits (D. NEEV et K.O. EMERY, 1967) : et l'on peut constater, dans cette étude, la liaison rigoureuse entre les phases évaporitiques et les changements qui ont affecté le climat ou les conditions de ruissellement. De même, les auteurs qui ont étudié les rares grands bassins sursalés actuels ont insisté sur les conditions d'extrême aridité qui y règnent; que ce soient les lagunes sursalées, tel le Boccana de Virrila sur la côte du Pérou (R. MORRIS et P. DICKEY, 1957), ou les bassins intérieurs tel le Kara-Bogaz (A.I. DZENS-LITOVSKIJ, 1956). Dans la plupart des cas, à la rareté des pluies, à l'inexistence de tributaires importants, s'ajoutent les effets d'une insolation forte et prolongée et de vents violents, secs et fréquents.

1. R. BAOUSSE convient d'ailleurs le paragraphe cité : « Il n'empêche que l'abondance de ces roches semble bien réfléchir un climat sec... ».

Source : MNHN, Paris

Les dépôts salins des régions arctiques ou antarctiques eux-mêmes n'échappent pas à ces conditions d'aridité. C'est ainsi que, dans l'Extrême-Nord du Groënland (B. FRISTRUP, 1953), ont été décrites des croûtes de sels pouvant couvrir de vastes superficies : ces croûtes, formées de chlorures et de sulfates de Mg et de Ca, se déposent au fond de bassins qui s'assèchent après avoir été alimentés par la fonte des neiges ou correspondent à des sels extraits des sols pendant la forte évaporation de l'été. Or le climat dans lequel se font ces dépôts est caractérisé par une grande aridité : faiblesse des précipitations (100 à 125 mm d'eau par an), vents extrêmement violents et fréquents, taux d'humidité souvent inférieur à 20 %. Des phénomènes comparables ont été également signalés dans la partie méridionale de la Terre de Victoria, dans l'Antarctique (G.W. GIBSON, 1962). Les sels existent, d'une part, en croûtes efflorescentes à la surface de la moraine et sur les parois des rochers; d'autre part, en dépôts de bassin stratifiés. L'origine des sels se trouve dans la désagrégation des différentes roches amenées à l'affleurement : leur concentration est rendue possible par les conditions extrêmes d'aridité, en particulier des valeurs de précipitations très faibles, inférieures à 6 pouces (15 mm).

Une dernière remarque enfin : cette extrême aridité, sans laquelle ne seraient pas apparus de dépôts évaporitiques, *nous ramène à la notion de désert* [1]. Notion tout à fait indépendante, d'ailleurs, d'un environnement purement continental. Ainsi que le prouvent de nombreux exemples dans la nature actuelle, où des mers baignent et traversent des régions d'une aridité désertique indiscutable [2]. En conclusion, il faut souligner que cette évocation d'un « faciès désertique », expression tant reprochée à M. GIGNOUX, *n'est nullement incompatible avec l'origine océanique des sulfates et chlorures des gisements évaporitiques.*

C. PRÉCIPITATION DES ÉVAPORITES EN IMPRÉGNATIONS INTERSTITIELLES OU EN SÉDIMENTS SUBAQUATIQUES.

L'origine océanique des grands gisements d'évaporites étant admise de façon très générale, il reste à préciser les modalités et les processus de la sédimentation. La cristallisation de sels au sein de sédiments — signalés par de nombreux auteurs dans la nature actuelle — sera le premier de ces modes de dépôt dont j'examinerai l'application aux séries anciennes.

---

1. En toute rigueur, le désert ne se définit pas par l'aridité mais par des critères biologiques tels que l'absence ou plutôt la rareté de la vie; l'importance de l'endémisme et des différentiations, provoqués par l'indépendance et l'isolement des biotopes, etc. (F. LAURENTIAUX-VIEIRA et D. LAURENTIAUX, 1963). Mais il n'en est pas moins certain que l'aridité est le facteur le plus efficace dans la réalisation du faciès désertique.

2. Certains auteurs me semblent en effet avoir considéré, à tort, que la présence de la mer exclut l'existence de conditions désertiques. Ainsi J. RICOUR, 1963 (p. 26) : «Quoique certains auteurs aient prétendu que l'Europe occidentale de l'époque triasique ait été un vaste désert, j'ai constaté que les formations franchement continentales sont très rares dans le Trias, alors que les influences marines sont largement dominantes ».

Au contraire, il est un fait absolument remarquable qui est apporté par la considération des valeurs de la salinité moyenne dans les océans actuels en fonction de la latitude : on constate que les valeurs maximales de cette salinité moyenne coïncident étroitement avec la position de la ceinture désertique mondiale, dans l'hémisphère nord en particulier. Voici les valeurs fournies par *The Encyclopedia of Oceanography* (1966, p. 760) :

Latitude (degrés) (hémisphère nord	Valeur moyenne de la salinité de surface
90	30,5
80	31,7
70	32,90
60	33,03
50	33,91
40	35,31
30	35,71
20	34,95
10	34,58
0	

Cela établit, d'une autre façon, l'importance de l'aridité dans l'enrichissement en sel d'une masse marine.

Source : MNHN, Paris

Dans notre monde, où la sédimentation d'évaporites constitue un phénomène exceptionnel, il est normal que les moindres manifestations en soient étudiées en détail. C'est ainsi que des auteurs ont décrit des imprégnations interstitielles de sels, résultat de processus subaériens et d'origine diagénétique, se déroulant en zones côtières émergées. Il est évident que de tels dépôts salins ne méritent plus le nom d'évaporites, dans la mesure où ils ne résultent pas de l'évaporation, mais d'une déshydratation par migration au sein d'un sédiment. Sur la côte de Nouvelle-Calédonie, J. AVIAS (1953) a signalé la présence de baguettes de gypse au sein d'une vase argileuse localisée 80 cm sous la surface de la « zone des marais secs », bande de terrain immergé seulement lors des marées d'équinoxes et située immédiatement en amont de la zone des mangroves. L'auteur émet l'hypothèse que le soufre proviendrait des matières organiques du marais ou de la pyrite des alluvions et le calcium des formations coquillières ou récifales envasées dans le marais. Mais il « ne rejette pas l'hypothèse d'une genèse par précipitation à partir des sels de l'eau de mer imbibant la zone de formation des cristaux ». Plus récemment, B. SHEARMAN (1966) a décrit le dépôt d'évaporites au sein de sédiments récents de la sebkha côtière d'Abu Dhabi (Trucial Coast, golfe Persique). Le site, long de 200 km et large parfois de 15 miles, est une plaine côtière suffisamment élevée pour rester hors d'atteinte des hautes marées de printemps; cette plaine est constituée de boue aragonitique et de matériel carbonaté d'origine marine. Les eaux souterraines qui imbibent cette sebkha dérivent de la mer, puis se concentrent par évaporation à tel point que, sauf à proximité du rivage, elles sont saturées en chlorure de sodium. *L'évaporation de ces eaux d'imbibition aboutit aux dépôts de nodules d'anhydrite, de gypse et de dolomie dans les sédiments de la zone capillaire.* L'auteur compare ces dépôts à ceux du Purbeckien de Warlingham (au Sud de Londres) et il en conclut à l'importance de ces processus dans les dépôts du passé.

Je rapprocherai de ces mécanismes le processus imaginé par J. BOURCART et J. RICOUR (1954), processus qui correspond à une phase plus tardive de la diagenèse : il s'agit de la cristallisation des sels originellement contenus dans l'eau d'imbibition de vases après leur enfouissement sous de fortes épaisseurs.

Il est évident que ces phénomènes, malgré leur intérêt certain, ne sauraient rendre compte des accumulations de sulfates et de chlorures rencontrées dans le Mésozoïque de la plate-forme saharienne. L'extension de ces dépôts sahariens, en particulier du Trias et du Lias, n'est pas compatible avec un processus mettant en jeu des circulations dérivées de la mer par un cheminement souterrain : une précipitation subaquatique peut seule être invoquée ici, à l'exclusion de dépôts subaériens. De plus, dans l'hypothèse de précipités diagénétiques, la *pureté* de certaines couches de sulfates et de chlorures — souvent observée dans les couches du Mésozoïque saharien — ne s'explique pas ; aucun processus de remplacement ne saurait être invoqué qui puisse rendre compte de la *disparition totale* du sédiment originel. Par contre, ce sont des mécanismes diagénétiques — précoces ou tardifs — du type de ceux décrits ci-dessus qui pourraient être à l'origine des nodules et des plages anhydritiques, salifères, parfois dolomitiques, observés et signalés avec tant de fréquence dans différents sédiments (grès, argiles, carbonates) du Trias en particulier et du Mésozoïque saharien en général.

D. LES ÉVAPORITES, DÉPÔTS LES MOINS PROFONDS DE LA SÉRIE SÉDIMENTAIRE MARINE.

Si la plupart des auteurs admettent que les grands gisements évaporitiques du passé ont pris naissance au fond de bassins reliés au domaine océanique, par contre en ce qui concerne la profondeur de dépôts, l'accord est loin d'être réalisé. Nous allons voir que ces interprétations *bathymétriques* sont même allées d'un extrême à l'autre, puisque les évaporites, considérées par les uns comme les dépôts les moins profonds de la série marine, ont été assimilées par les autres à des dépôts de fosses. Voyons d'abord les théories « peu profondes » qui sont les plus anciennes et, encore à l'heure actuelle, les plus courantes.

Bien des raisons se trouvent à l'origine de la notion selon laquelle les évaporites représentent les dépôts les moins profonds de la série sédimentaire marine. Il n'est pas sans intérêt de les analyser et d'examiner quels phénomènes, observables dans la nature actuelle, ont pu amener, par comparaison, à une telle conception.

Source : MNHN, Paris

Tout d'abord, la *considération des sites de dépôts d'évaporites dans la nature actuelle*. On sait que, parmi ces sites, les plus vastes et les plus importants sont les *marais salants marginaux* [1], sortes de plaines d'inondation qui reçoivent l'eau de mer durant les marées de vives eaux ou au cours de certaines tempêtes. L'exemple le plus célèbre est le Rann of Cutch où une superficie de 18 000 km² peut se trouver inondée par l'eau de mer en été. L'eau s'évapore pendant l'hiver et abandonne une fine croûte de sel, qui atteint une épaisseur de plusieurs pieds dans quelques mares. Il est certain qu'un milieu de sédimentation moins profond que celui-ci n'est pas concevable [2].

Or il est très fréquent de voir évoquer à propos des dépôts d'évaporites du passé un milieu de sédimentation analogue aux marais salants marginaux : Ch. FINATON note avec justesse que, « depuis les travaux de DIEULAFAIT, il a été universellement admis que le gypse du bassin de Paris était dû à l'évaporation des eaux de la mer dans des lagunes jouant le rôle de *marais salants naturels*. Un peu plus tard, les études et les expériences de VANT' HOFF ne firent que confirmer cette opinion ».

Sans pouvoir le moins du monde être assimilé à un marais salant naturel, le golfe de Qatar, dépendance du golfe Persique, montre une augmentation importante de la salinité dans une étendue d'eau peu profonde, en position marginale : le golfe s'allonge sur 200 km de long entre le continent arabique et la péninsule de Qatar; les profondeurs y sont le plus souvent inférieures à trois brasses (5,5 m); la chlorinité qui est de 23g/kg à l'embouchure, atteint 34 g/kg au fond du golfe, valeur qui n'autorise pas de cristallisation et de dépôt, mais qui représente néanmoins une concentration notable (W. SUGDEN, 1963).

La considération des *marais salants artificiels* va évidemment dans le même sens en évoquant une profondeur de dépôt extrêmement faible.

Et puis, il y a les *expériences* menées sur l'évaporation de l'eau de mer et la forme particulière qui est habituellement donnée à l'exposé de leurs résultats. J. USIGLIO, dès 1849, a publié une « étude sur la composition de l'eau de la Méditerranée et sur l'exploitation des sels qu'elle contient », travaux à propos desquels P.C. SCRUTON écrivait un siècle plus tard (1953) : « *Usiglio's experiments on evaporation of sea water furnish, so far as is known, the only existing chemical data basic to the entire evaporite problem* ». Dans ces études, J. USIGLIO note, en fonction des valeurs croissantes de densité de l'eau et du volume d'eau restant après l'évaporation et le dépôt, la nature des sels déposés et le poids de chacun d'eux.

Le plus souvent, ces observations, portant sur la succession des sels qui apparaissent en fonction de l'élévation de la concentration, ont été exprimées de la manière suivante : « L'évaporation d'une *colonne d'eau de 1 m de hauteur* a donné les résultats suivants : *a*. Le dépôt commence à se former lorsque la *hauteur est réduite à 0,533 m*. Il se dépose alors du carbonate de chaux...; *b*. Lorsque la hauteur d'eau est réduite à 0,19 m, le sulfate de chaux commence à se déposer...; *c*. Déjà à la hauteur de 0,095 m... le chlorure sodique commence à se précipiter..., etc. » (P. FOURMARIER, 1949, p. 293). C'est-à-dire que l'on a énuméré, *en fonction de la hauteur d'eau résiduelle*, la nature et le poids de chacun des sels déposés.

Or, si étonnant que cela paraisse, il semble que ces résultats expérimentaux ont été souvent transposés brutalement dans les interprétations paléogéographiques qui sont proposées par le géologue en présence des successions lithologiques. C'est ainsi que l'apparition, dans une coupe, d'évaporites succédant à des carbonates, appelle le plus souvent le même genre d'explication : *diminution de la profondeur d'eau*, ou bien renforcement des influences littorales ou — ce qui veut dire la même chose — mouvement d'exondation, ou encore — en un mot — *régression*. Je reviendrai ci-dessous sur cette dernière notion. A titre d'exemple, choisi dans un domaine voisin de celui étudié ici, l'apparition de gypse dans le Cénomanien de l'Atlas

---

1. *Marginal salt pans* de la classification de Ch. CHADAU (1920).

2. Cette interprétation du sel du Rann of Cutch, déjà adoptée par Ch. LYELL, n'a pas été entièrement confirmée par les études plus récentes. En particulier, L.B. PLATT (1962) estime qu'il faut restreindre considérablement l'extension de la zone inondée par la mer, et que la croûte saline est, en réalité, formée par l'évaporation lente de l'eau très salée qui imbibe le sous-sol et qui arrive à la surface par attraction capillaire

Source : MNHN, Paris

saharien est ainsi commentée (J. EMBERGER, 1960, p. 260) : « Dans la partie supérieure du Cénomanien, les apports devenant relativement plus abondants, la sédimentation a gagné sur la subsidence, favorisant ainsi l'établissement d'un domaine lagunaire ».

En fait dans la nature actuelle, éminemment peu propice aux dépôts d'évaporites, les plaines d'inondation, *surface horizontale à la limite de l'émersion*, constituent un des sites où de tels dépôts peuvent prendre naissance : les évaporites y cristallisent effectivement sous une tranche d'eau pelliculaire ou même en régime subaérien, toute l'eau finissant par s'évaporer. Mais il est difficile, je crois, d'expliquer ainsi les grands gisements d'évaporites du passé. Deux sortes d'objection me semblent en effet devoir être prises en considération. Les unes concernent le jeu de la subsidence. En théorie, et en faisant jouer le facteur « temps », on peut imaginer que des dépôts de plaines d'inondation finissent par constituer des couches évaporitiques épaisses de plusieurs centaines de mètres. Mais ne voit-on pas l'équilibre très délicat qui doit être maintenu entre l'importance de la subsidence et le niveau océanique, avec tous les facteurs qui déterminent et modifient ce dernier ? Une subsidence trop rapide et c'est l'envahissement par la mer et l'annexion au domaine océanique normal. Que la subsidence devienne trop lente, les inondations cessent, et la croûte saline déjà sédimentée se trouve exposée aux actions météoriques : même en supposant la permanence d'une aridité quasi totale — qui soustrait les couches déposées à la dissolution et au lessivage — la déflation éolienne aurait tôt fait de disperser le gisement. En fait, l'extrême rareté de ces marais salants naturels prend sa source précisément dans la précarité de l'équilibre qui est exigé : supposer la pérennité d'un tel équilibre revient à émettre une hypothèse peu probable.

L'autre objection repose sur la régularité des faciès et sur leur grande extension que l'on observe dans de nombreux gisements d'évaporites du passé. Parce que la plaine d'inondation appelle des apports à la fois saccadés et d'inégale importance, j'en imagine les dépôts sous la forme de fines successions et d'alternances de sels différents. Et je ne crois pas que de tels paysages puissent rendre compte des accumulations observées, par exemple (fig. 1 et 2) dans le Salifère principal (Trias-Lias) saharien : plusieurs centaines de mètres de sel gemme, dans un domaine méridional, plusieurs centaines de mètres d'anhydrite quelques dizaines de kilomètres au Nord. Un tel schéma me semble n'avoir pu se réaliser que sous une certaine tranche d'eau et dans un bassin à caractère permanent.

Régression et faciès salifères.

Les *dépôts salins*, comme n'importe quel autre faciès, *peuvent reposer en transgression discordante sur une série plus ancienne*. On peut penser que si la fréquence de ce phénomène n'a pas été reconnue plus tôt, cela tient uniquement à la fragilité des évaporites vis-à-vis des actions météoriques, dès qu'elles arrivent à l'affleurement. Actuellement, la multiplication des forages profonds permet de constater combien cette disposition est répandue.

Un exemple particulièrement caractéristique a été révélé par les sondages du Grand erg occidental et du Mzab, au Sahara algérien. Au cours d'un travail de réinterprétation et de synthèse auquel je me suis livré sur ces forages, j'ai essayé de préciser la disposition et la nature de la transgression triasique, discordante sur un socle paléozoïque très légèrement déformé. La figure ci-jointe (fig. 3) résume, dans un domaine allant de Laghouat au Nord à Guerrara au Sud et de Dzioua à l'Est à l'erg el Anngueur à l'Ouest, les principales caractéristiques de ce contact. Je négligerai ici l'importance de la nature lithologique du socle paléozoïque et des paléoreliefs dont elle a réglé la situation, dans la répartition des couches gréseuses triasiques. Je ne m'occuperai que de la partie occidentale de la zone ainsi schématisée. On voit qu'au cours de l'étalement du domaine sédimentaire sur la plate-forme saharienne — étalement qui caractérise tout le Mésozoïque — le sel gemme, lors de l'important épisode du Salifère principal (Trias supérieur, Lias *p.p.*) s'est déposé partout, y compris sur le Paléozoïque. La portion de la plate-forme saharienne où le sel dépassant l'extension des niveaux antérieurs est ainsi venu en transgression discordante sur le Paléozoïque — directement ou par l'intermédiaire de quelques mètres d'argiles salifères — dépasse largement le cadre de mon schéma. En fait cette portion correspond à plus de 50 000 km², allant du Mzab à El Golea et des confins atlasiques à la région d'Hassi Leila. Dans le détail, des carottes prélevées au contact du Trias et du Paléozoïque ont montré que le sel gemme massif reposait parfois *directement* sur le socle sous-jacent (ex. : forage d'Ak 1).

Source : MNHN, Paris

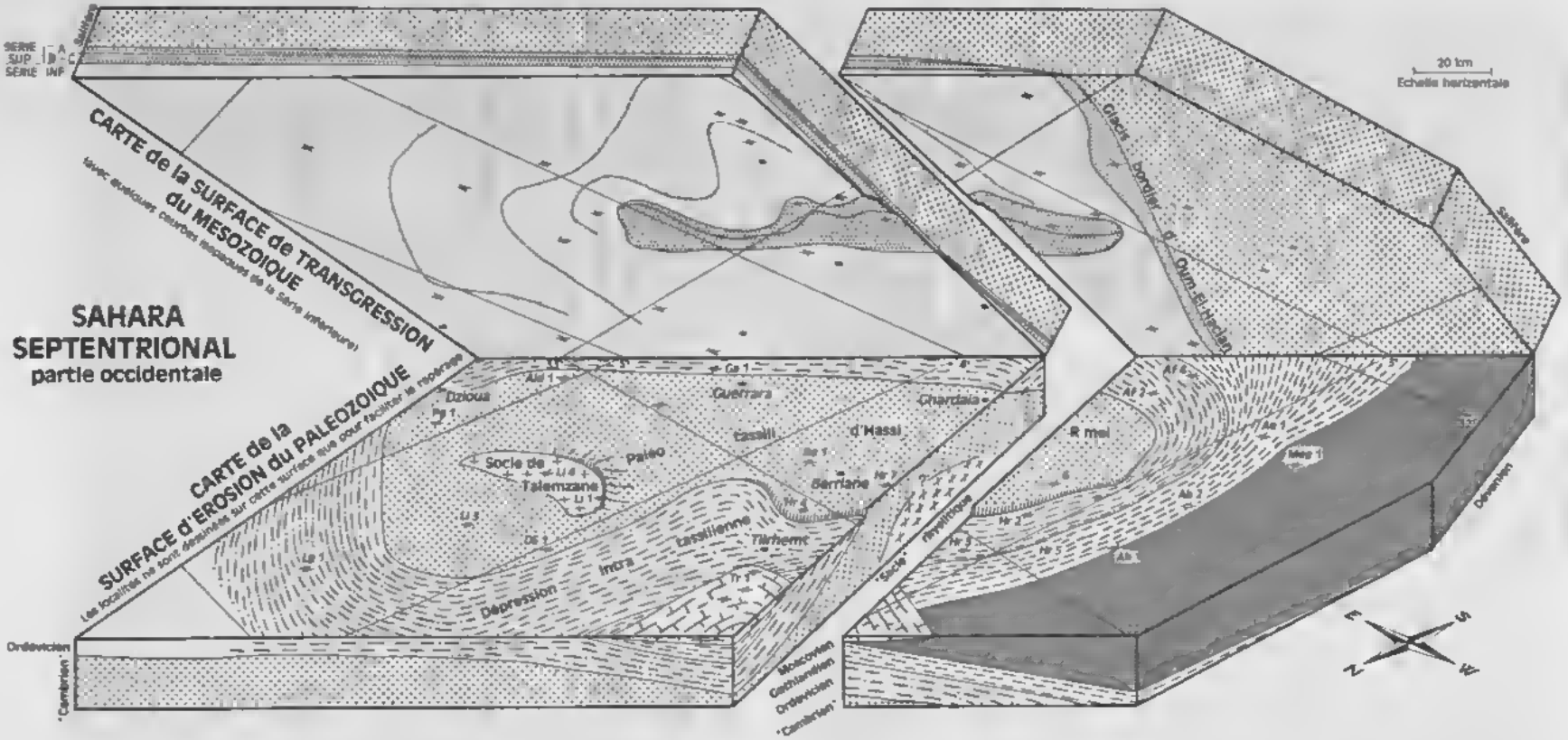


FIG. 3. — Bloc-diagramme double destiné à illustrer la discordance du Mésozoïque sur le Paléozoïque dans la partie centrale et occidentale de la bordure nord-saharienne et à montrer le caractère largement transgressif du sel gemme triasique au Sahara occidental.

Les blocs inférieurs montrent la disposition des terrains paléozoïques tronqués par la discordance; tandis que les blocs supérieurs décrivent les terrains mésozoïques discordants. Je n'insiste pas ici sur l'existence de paléo-reliefs dont la position a été déterminée par la dureté et le caractère plus ou moins massif du matériel paléozoïque; ni sur l'importance de ces paléo-reliefs dans la répartition des différents ensembles gréseux. Je ne mettrai l'accent que sur le caractère très largement transgressif du sel gemme dans toute la partie occidentale du domaine traité : au-delà du glacis bordier d'Oum el Haciau, le sel se trouve en effet superposé au Paléozoïque sans que s'interpose le moindre niveau gréseux ou conglomératique et ceci sur une immense superficie.

Source : MNHN, Paris

Cette position transgressive du sel semble avoir parfois gêné les auteurs. A. Perrodon (1968), par exemple, en a donné une explication structurale assez complexe : une sorte d'extravasement du cadre du bassin provoquerait une remontée du tréfonds dans les aires centrales et un abaissement des zones marginales. En réalité, on peut penser que ces hypothèses complexes ne sont dictées que par le désir d'échapper à la contradiction exprimée par une simple proposition : « les faciès de régression apparaissent transgressifs » (*ibid.* p. 13). Or, il est aisé de démontrer que l'apparence de contradiction ne prend sa source que dans une mauvaise définition des mots : il y a confusion entre régression *marine* à laquelle correspondent les faciès salifères et *transgression tout court*, c'est-à-dire étalement du domaine sédimentaire. Et, de fait, si dans nos régions européennes classiques, l'étalement du domaine sédimentaire correspond souvent à une transgression *marine*, l'étude des plates-formes et singulièrement de la plate-forme africaine accumule les exemples d'étalement du domaine sédimentaire qui ne sont pas jalonnés le moins du monde par des dépôts marins, mais continentaux. Il n'y a donc aucune impossibilité et même aucune contradiction dans le fait que des faciès de régression *marine* s'avancent en transgression discordante sur un socle arasé. Un autre exemple est fourni par l'étude du Trias supérieur du bassin de Paris; des marnes bariolées intercalées de niveaux salifères reposent en effet sur le socle. Et de la même manière, l'interprétation de ces phénomènes (J. Ricour, 1963) me semble pêcher par insuffisance de précision quant à la nature des régressions et transgressions. La phrase suivante, relevée dans ce travail (J. Ricour *op. cit.*, p. 26) qui est pourtant l'une des synthèses contemporaines les mieux documentées, montre à quel point, dans ce domaine, un certain laisser-aller verbal peut engendrer la confusion des idées : « J'ai démontré que les dépôts du Keuper... sont largement transgressifs sur ceux du Muschelkalk et ne peuvent pas par conséquent être considérés comme continentaux ». Je ne songe pas un instant à discuter les faits énoncés : transgressivité du Keuper, caractère marin des dépôts. Ce sont les notions fondamentales de géologie sédimentaire qui sont à la base du raisonnement logique qui me paraissent à reprendre. Que des dépôts soient transgressifs sur d'autres, cela signifie étymologiquement et logiquement, qu'ils sont « allés plus loin » que des dépôts antérieurs. Cela ne saurait être un argument formel, une preuve en faveur de leur caractère continental ou marin; sauf, encore une fois, à confondre transgression marine avec transgression des dépôts sédimentaires, à un point qui dépasse le simple *lapsus*.

E. LA THÉORIE DE LA RARRE.

Dans la nature actuelle, le milieu marin est d'une extrême homogénéité : dans les mers ouvertes, la salinité conserve une assez grande constance et, lorsque des conditions particulières entraînent des modifications de la valeur globale de la salinité, le rapport des ions au moins reste remarquablement constant. Aussi, ne conçoit-on pas — quelles que soient les conditions climatiques générales — la concentration et le dépôt de sels dans le domaine océanique ouvert. D'où l'idée de la précipitation des sels marins dans des portions *isolées* de la mer ouverte.

Par ailleurs, les dépôts évaporitiques actuels s'opèrent en général sous une très faible tranche d'eau (Kara-Bogaz, lac Eyre, Sebkhas nord-africaines — par exemple sebkha el Melab dans le Sud-tunisien — partie sud de la mer Morte, Rann of Cutch, etc.). Mais cette faible tranche d'eau ne peut nourrir le dépôt que d'une quantité extrêmement minime de sels. Il est donc nécessaire — pour expliquer les grandes accumulations de sels — de concevoir une alimentation en eau salée à partir du domaine océanique, au fur et à mesure de l'évaporation dans le bassin de dépôt.

De ce point de vue quantitatif, la considération des évaporites du Mésozoïque saharien apporte des arguments de poids. J'ai exposé ci-dessus, que dans le seul domaine rigoureusement reconnu par sondages, le Salifère principal renfermait une quantité de sel de l'ordre de 100 000 km³ : soit, *si l'on s'en tient à la superficie envisagée* de l'ordre de 500 000 km², *le sel résultant de l'évaporation d'une mer profonde de 15 000 m.* De toute évidence, il est extrêmement peu vraisemblable que l'ensemble de la plate-forme saharienne ait été englouti à cette époque sous 15 000 m d'eau de mer...

On sait qu'aux arguments quantitatifs, s'ajoute un argument qualitatif. Le fait de retrouver des masses importantes d'anhydrite au-dessus des bancs de sel est incompatible avec la notion d'un cycle d'évaporation unique : en effet, dans l'évaporation d'une masse d'eau donnée,

Source : MNHN, Paris

le sulfate de calcium précipite en totalité avant le chlorure de sodium, du moins avant que tout le chlorure de sodium ait précipité. On ne saurait donc en retrouver après. D'où, une nouvelle fois, la nécessité d'une réalimentation en eau salée pour expliquer les successions évaporitiques maintes fois observées.

La solution imaginée la plus communément par les auteurs pour interpréter ces dépôts est celle de la « barre »; solution exprimée pour la première fois par G. Bischof, semble-t-il, puis par C. Ochsenius (1877), qui a été suivi dans cette voie par de très nombreux auteurs.

« Si l'on imagine un bassin fermé contigu à une mer plus vaste et communiquant avec elle par un détroit peu profond, dont le fond forme seuil sous-marin ou barre, un commencement d'évaporation sur le bassin fermé doit nécessairement amener la descente des eaux plus chargées de sels, donc l'impossibilité pour elle de retourner vers la mer dont elles sont séparées par la barre, tandis que le vide résultant est comblé au-dessus par un apport de nouvelle eau de mer superficielle. Ainsi doit progressivement s'augmenter la salure du bassin jusqu'au moment où, quelle que soit son épaisseur, l'évaporation s'y réalise et le sel s'y précipite. Ce sel ayant en réalité une origine illimitée dans la mer voisine, peut ainsi remplir un bassin fermé avec une épaisseur infiniment supérieure à celle qu'aurait comportée l'épaisseur d'eau initiale ». C'est ainsi que L. de Launay (1913, p. 228) résumait cette théorie de la barre,en y apportant son adhésion complète, un demi-siècle avant qu'elle connaisse chez nous le renouveau de succès que l'on sait...

En fait, *dans la nature actuelle*, lorsqu'un tel dispositif est réalisé en climat aride, il en résulte effectivement une concentration des sels et dans certains cas leur précipitation. C'est le cas dans le modèle, combien classique, du Kara Bogaz, dont la considération avait amené G. Bischof, puis C. Ochsenius à émettre cette théorie. Et en bien d'autres points du monde, un certain nombre de bassins, plus ou moins séparés par des seuils du domaine océanique général, sont le siège, sinon de précipitations salines, au moins d'une élévation de la salinité des eaux ainsi confinées. Sur la côte péruvienne, le Boccana de Virrila est un estuaire relique situé dans une région d'aridité extrême : à une vingtaine de kilomètres de l'embouchure, un petit seuil, constitué de barres sableuses peu profondes et d'îles, sépare un « environnement pénésalin » extérieur d'un « environnement salin » intérieur (R. Morris et P. Ogkey, 1957). De même, dans la Shark bay, sur la côte occidentale australienne, la conjonction d'un climat aride et de barrières d'îles et de barres peu profondes, installées perpendiculairement à l'allongement du bassin et près de son embouchure, a créé un gradient de salinité horizontal non négligeable : depuis des valeurs normales à l'embouchure (salinité de 36 à 39 ‰) jusqu'à 65 ‰ tout à fait au fond des baies (B.Logan, 1961).

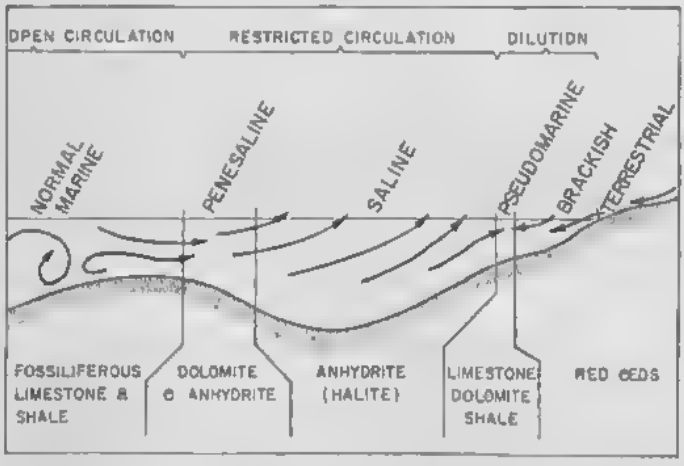


Fig. 4. Schéma dû à L.L. Sloss (1953, p. 156, fig. 6) reliant la nature des dépôts, en particulier évaporitiques, à la présence d'un seuil. Celui-ci isole de la mer ouverte une zone qui se trouve de ce fait confinée (*restricted circulation*) dans laquelle peut se déposer de l'anhydrite et éventuellement du sel gemme. La dilution introduite par les apports d'eaux continentales amène la réapparition du calcaire et de dolomie, à proximité du continent : environnement qualifié de pseudo-marin. Plus près encore du continent apparaissent enfin des couches rouges.

Source : MNHN, Paris

Les barres ou seuils, ainsi imaginés par les auteurs pour expliquer les gisements évaporitiques du *passé*, sont d'une assez grande diversité. Et d'abord, diversité dans le *relief* qu'ils constituent. Pour L. L. Sloss par exemple (fig. 4), il s'agit d'un seuil submergé ou partiellement submergé, empêchant la sortie des eaux hypersalines du fond : « *It is probable that if such a basin were available for study to day, a casual observer could row a boat from the area of normal salinity into the area of high salinity and evaporite deposition without noting any change at the surface of the sea* » (p. 158). Pour H. Borchert (1965), au contraire, si le seuil est largement submergé, un courant riche en sel peut s'échapper, s'opposant à tout dépôt d'évaporites : courant comparable en tous points à celui qui franchit le seuil de Gibraltar et s'écoule dans l'Atlantique. Et cet auteur de réclamer une véritable séparation entre le bassin de dépôt et la mer libre, seulement percée d'un chenal *long, étroit et peu profond* : les évocations qui reviennent dans l'exposé de H. Borchert sont celles des Dardanelles, du Bosphore, ou, à la rigueur, du Kattegat. Diversité de *nature* aussi. Pour la plupart des auteurs, c'est un obstacle *topographique*, dont la surrection est à imputer à des causes tectoniques. H. Borchert par exemple, voit dans la surrection tectonique de tels seuils le mécanisme fondamental de la formation des évaporites et de la précipitation des différents sels. Partant du postulat que le climat reste constant, H. Borchert note que l'enfoncement ou l'exhaussement de la région du chenal aura une grande influence sur la composition des saumures ; ainsi les variations complexes de concentration du Zechstein 3 et 4 sont interprétées comme étant causées par des mouvements tectoniques de la région de la barre. Cet auteur n'hésite pas à conclure que les variations de concentrations observées peuvent être utilisées pour donner des « tectonogrammes de la barre ». Dès maintenant, il me paraît à souligner que ce mécanisme trop exclusivement tectonique se heurte à bien des difficultés. On conçoit aisément qu'en un lieu donné et *en un instant donné* le hasard fasse que la surrection tectonique d'un seuil aboutisse aux dépôts d'évaporites. Ce qui exige que soient réalisées des conditions précises, subtiles et délicates : une surrection trop forte aboutissant à l'émersion totale mettrait fin à l'alimentation du bassin et à la sédimentation évaporitique ; et, par contre, offrirait prise à l'érosion et se signalerait par des faciès clastiques et de démantèlement ; une surrection insuffisante ne permettrait plus au seuil de jouer son rôle principal qui est la rétention des saumures profondes. Mais que l'activité des forces tectoniques entretienne cet équilibre délicat pendant une période prolongée et conjointement avec le jeu de la subsidence généralisée, de façon à permettre le dépôt de masses salines épaisses de plusieurs centaines de mètres, voire de plusieurs kilomètres: voilà ce qui paraît moins facilement admissible.

Le Kara-Bogaz — pourtant si souvent considéré comme le meilleur modèle de bassin évaporitique — illustre d'ailleurs parfaitement les problèmes auxquels je fais allusion. La subsidence régionale est extraordinairement minime : l'Oligocène forme le substratum de 42 m de séries (A.I. Dzens-Litovskij, 1956, fig. 5). Dans une telle région de plate-forme, les variations de niveau de la mer Caspienne suffisent pour créer des alternances de couches de dépôts salins — quand la Caspienne baisse et que la flèche émerge — et d'argiles fossilifères — quand une élévation du niveau de la Caspienne amène une submersion totale de la barre : au total, cela est tout à fait différent des grands gisements évaporitiques, caractérisés, comme on le rappellera ci-dessous, par une subsidence très importante et des couches de sel homogènes, parfois très épaisses.

D'autres hypothèses, sans doute, permettent d'expliquer plus aisément ce phénomène complexe, qu'est la persistance d'un *seuil*, ajusté à la genèse d'évaporites : et tout d'abord, la *nature récifale* de tels obstacles, laquelle est d'ailleurs plus qu'une hypothèse, puisqu'on a fréquemment observé, dans les gisements anciens, l'interposition d'une barre récifale entre le domaine marin ouvert et les gisements évaporitiques. Dans ce cas, la réalisation d'un seuil et son maintien sensiblement au niveau de la mer résultent des lois biologiques qui gouvernent le développement des organismes constructeurs eux-mêmes : en cas de subsidence ralentie, les organismes ne sauraient en effet dépasser le niveau de la mer et, *vice versa*, si la subsidence s'accélère il est normal que les organismes prolifèrent plus rapidement et que de toute façon l'arête de l'édifice demeure à fleur d'eau, dans les conditions biologiquement optimales. Et dès lors que se trouve réalisé systématiquement un tel édifice à fleur d'eau, la moindre brèche qui s'y trouve ouverte permet exactement la réalisation du dispositif décrit par C. Ochsenius. On sait qu'à côté des vrais récifs avec « leur allure topographique, leur structure résistante aux vagues et les autres caractéristiques d'un bioherme récifal », il faut également considérer les barres ou bancs de débris bioclastiques, Crinoïdes, Algues, etc.

Source : MNHN, Paris

Un autre processus peut aboutir *naturellement* à la formation d'une barre ou d'un seuil : c'est l'édification de flèche littorale à matériel sableux ou graveleux. Dans certaines conditions en effet une baie peu profonde tend à se fermer, soit sous l'effet de courant côtier, soit sous l'effet de phénomènes oscillatoires affectant la nappe d'eau correspondant à la baie (seiche uninodale par exemple). Le seuil, son édification jusqu'à la surface de l'eau, sa pérennité éventuelle au fur et à mesure du jeu de la subsidence générale, n'offrent plus alors le caractère un peu miraculeux du seuil tectonique mais résulte, comme une conséquence inéluctable, du processus même de construction.

Les successions de seuils. Je rappellerai que la théorie de la barre a parfois été « perfectionnée » en une théorie de barres successives (E.B. Branson, 1915). Cette suite de barres individualise une série de corps d'eau, en connection malaisée les uns avec les autres. Ainsi dans un premier bassin, les saumures pourront déposer du gypse, les eaux résiduelles passées dans le bassin suivant pourront précipiter de l'halite et, enfin, dans un bassin ultime, cristalliseront les sels les plus solubles (sel de potassium en particulier). De cette façon s'expliquerait l'existence d'importants dépôts de gypse non surmontés de sel gemme, ou de sel gemme non précédés de gypse.

Je préciserai immédiatement que les observations faites sur les évaporites du Mésozoïque saharien s'opposent catégoriquement à une telle interprétation. Aucun seuil, aucune barre, aucune barrière matérielle quelle qu'elle soit n'a séparé l'aire du dépôt des sulfates de celle du dépôt des chlorures, par exemple au Salifère principal. Le passage de l'une à l'autre est continu, parfaitement progressif (fig. 1 et 2) et ne se marque par aucune particularité sur les cartes d'isopaques. Le phénomène consiste en une *ségrégation chimique* qui ne peut être mise en rapport — semble-t-il — qu'avec le plus ou moins grand éloignement de la mer ouverte, mais non avec un relief local.

Théorie de la barre et interprétations bathymétriques des évaporites. La théorie de la barre n'implique pas formellement de conditions précises quant à la profondeur de dépôt des évaporites qui précipitent en arrière de ladite barre. Dans le Kara-Bogaz, la sédimentation saline actuelle se fait sous une dizaine de mètres d'eau en moyenne (maximum : 13 m). Toutefois le schéma (fig. 4, p. 142) qui réunit la mer ouverte, un seuil et un bassin derrière ce seuil, suggère déjà un certain classement « bathymétrique » des sédiments : sans considérer la mer ouverte avec l'extrême variété morphologique que son fond peut présenter, on peut au moins noter que les *dépôts de la région du seuil* (sableux ou graveleux aux abords d'une flèche; calcaires ou dolomitiques aux abords d'une barrière récifale) *doivent être moins profonds que ceux du bassin qu'ils délimitent* : sans quoi, il n'y a pas seuil et bassin, mais simplement une plate-forme. C'est-à-dire qu'*a priori* les évaporites ne se présentent plus avec le caractère quasi obligatoire du dépôt le moins profond de la série sédimentaire. Il nous reste à voir le développement de cette notion et la fortune qu'elle a connue.

F. LES ÉVAPORITES, DÉPÔTS PROFONDS.

Certaines interprétations aboutissent à une conclusion « bathymétrique » tout à fait opposée à celle classiquement admise : les accumulations salines ne sont plus considérées comme les dépôts que laisse précipiter l'ultime tranche d'eau avant sa disparition totale par évaporation, mais comme des sédiments de bassins relativement profonds. Plusieurs observations sont à l'origine de ces notions qui s'appuient en outre sur certaines expériences et relations physico-chimiques.

1. *Les observations faites dans les séries géologiques.*

Elles peuvent être classées en deux catégories, nettement distinctes par le raisonnement explicatif auquel elles font appel.

a. La disposition des faciès en rapport avec les différences de subsidence.

Les rapports tout à fait étroits qui existent entre les sédiments évaporitiques et les zones subsidentes, davantage, l'importance des flexures dans la délimitation des évaporites sont des phénomènes importants, à la fois par leur fréquence et par les relations qu'ils suggèrent entre ces dépôts et la profondeur du milieu de sédimentation.

Source : MNHN, Paris

1. *Les exemples sahariens.*

Les séries mésosoïques sahariennes, en particulier celles qui existent aux affleurements, fournissent d'excellents exemples de pareilles dispositions et j'en rappellerai maintenant les caractéristiques les plus remarquables.

Il convient de se placer d'abord d'un point de vue très général. Les grosses masses d'évaporites apparaissent évidemment surtout aux époques de rémission des apports détritiques : abondantes au Trias supérieur (Salifère principal), au Lias, au Crétacé supérieur, elles sont plus rares ou absentes au Trias inférieur et moyen, au Jurassique supérieur, au Barrémien ou à l'Albien. Mais *toutes* les époques de rémission des apports détritiques n'ont pas été les témoins d'une sédimentation évaporitique. Il semble, toujours en schématisant, que les phases *étales, celles où l'épaisseur des dépôts, c'est-à-dire l'importance de la subsidence est relativement constante* à l'échelle de tout le bassin, sont caractérisées plutôt par des carbonates. Au contraire, les grosses masses d'anhydrite ou de sel peuvent apparaître lorsque se manifeste une subsidence très variable : ainsi, au Salifère principal, la subsidence considérable de la région de Dorbane-Hassi el Amrane par rapport au reste du bassin. En somme, on a parfois l'impression que ce qui appelle la sédimentation des évaporites, c'est la subsidence, ou, plus exactement, l'existence d'une subsidence différentielle.

Considérons maintenant avec plus de détails les caractéristiques de ces époques à évaporites. Voyons, en particulier, la disposition des différents faciès et leur répartition par rapport à la subsidence, toujours dans le cas des séries mésozoïques sahariennes. Les études de terrain permettent, dans certains cas privilégiés, de repérer des zones de flexures; celles-ci viennent rompre l'extrême monotonie de ces plateaux secondaires, dont le pendage est en général de l'ordre du degré ou même inférieur. Or, fréquemment, ces flexures délimitent exactement deux domaines lithologiquement bien différents : la partie actuellement exhaussée se caractérise par une sédimentation mince et principalement carbonatée; le domaine abaissé, par une sédimentation évaporitique épaisse. En somme, ces flexures ont joué déjà pendant la sédimentation; elles ont joué dans le même sens que leur mouvement récent et, enfin, elles délimitent très exactement les dépôts évaporitiques d'une part, carbonatés d'autre part.

Dès maintenant, on voudra bien admettre qu'il serait paradoxal de considérer que l'aire la plus subsidente a été le domaine sédimentaire où la tranche d'eau a été la plus mince et la plate-forme résistante, la zone profonde.

L.L. Sloss (1953) et ses disciples, constatant cette apparition de carbonates sur les bordures de bassins évaporitiques, interprètent le fait par la dilution de la saumure à la bordure du continent qui alimente le bassin en eau douce. Mais pourquoi alors ce « passage de faciès » a-t-il lieu sur les flexures ? L'abondance des eaux météoriques continentales est fonction de la taille du continent, de l'importance des précipitations, de la latitude, du couvert végétal, du relief, etc. Tous facteurs qui n'ont rien à voir avec la morphologie du fond du bassin et ses déformations et qui devraient, si la dilution avait effectivement un rôle prépondérant dans ce passage de faciès, localiser celui-ci n'importe où, mais pas spécialement sur les flexures.

Ces passages de faciès entre des sels de solubilité différente (carbonates, sulfates, chlorures), souvent localisés sur les zones de flexures, doivent être examinés de plus près. Deux cas assez différents s'observent, sur la plate-forme saharienne en particulier, que j'évoquerai en rappelant brièvement certaines conditions de gisement.

1. *Les évaporites disparaissent sur les bordures du bassin.* Le premier cas sera illustré (fig. 5) par le passage des gypses de la Mestaoua aux « dolomies informes » de Cbafiet ech Chaba, dans le Lias-Dogger de la Djeffara tunisienne (G. Busson, 1967). Là, la notion d'un « passage de faciès » n'est pas entièrement confirmée par des observations de détail. En fait, fréquemment, *dans la zone subsidente, la masse évaporitique est coupée par des passées carbonatées. Et l'on constate que ces dernières, et ces dernières seules, se sont étalées sur le domaine résistant, y constituant la série carbonatée mince.* Puisqu'il n'y a dépôt d'évaporites que lorsque le jeu de flexures délimite des zones à affaissement rapide, et uniquement dans ces zones; puisqu'il y a dépôt de carbonates, sur toute l'aire sédimentaire, dès que ces zones cessent de se singulariser, on voit qu'il est difficile d'échapper à l'idée de faire jouer le rôle prédominant à la morphologie du plancher sédimentaire. L'hypothèse que l'on est amené à formuler est donc la suivante :

Source : MNHN, Paris

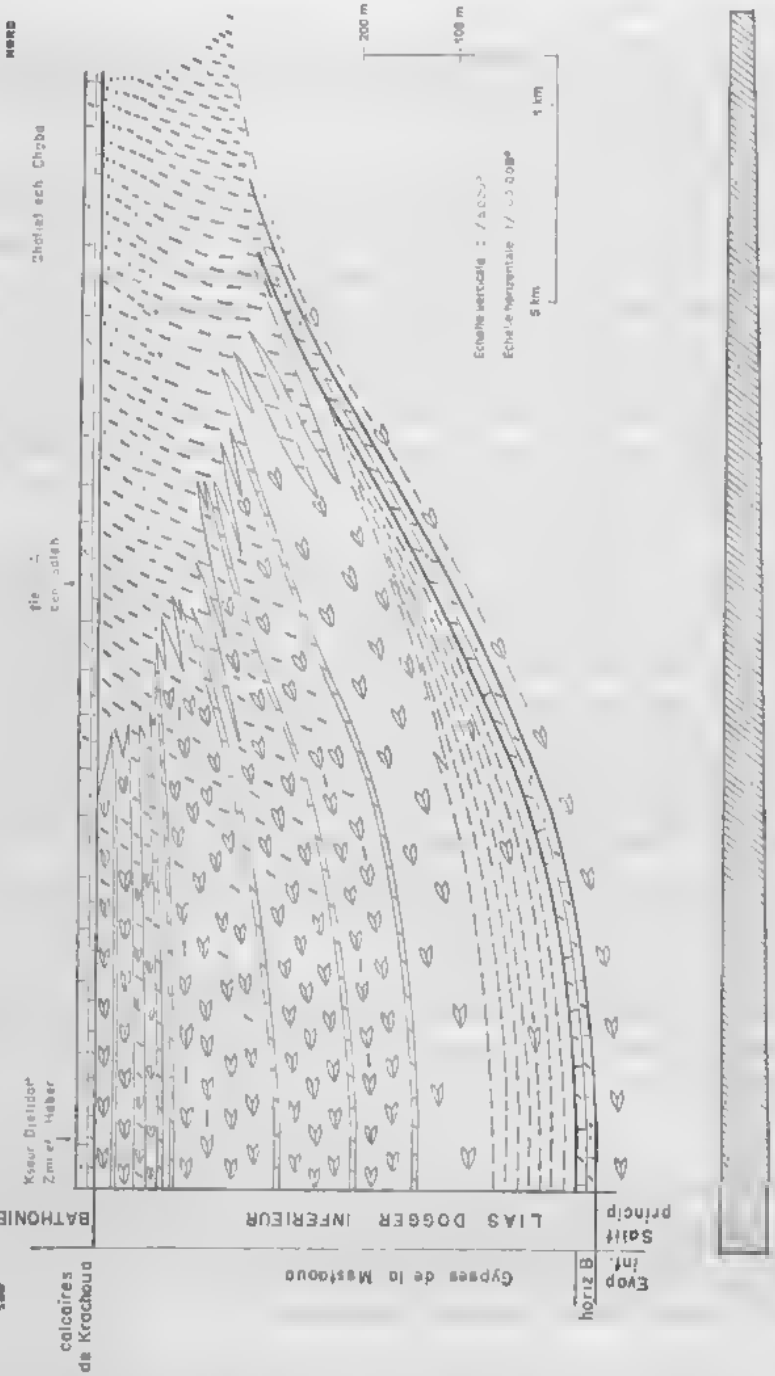


FIG. 5. — Coupe schématique du Lias Dogger du Sud-tunisien de part et d'autre de la vallée de l'oued Tatahouine, en aval de Foum Tatahouine, montrant les rapports entre les faciès et les différentes zones de subsidence.

Dans la région méridionale, une subsidence relativement importante a permis le dépôt de séries épaisses : celles-ci sont très envahies par le gypse (Gypses de la Mestaoua), qui se trouve d'ailleurs strictement cantonné à cette partie subsidente. *Au Nord de Zmilet Haber* (36 gr. 60 N.), les épaisseurs diminuent beaucoup et rapidement. En même temps, le faciès se modifie : seules les intercalations dolomitiques des gypses de la Mestaoua s'étendent à la partie Nord, amincie; ce sont les phases *stalas* marquées par la généralisation du faciès carbonaté sur l'ensemble du domaine considéré. Les gypses au contraire disparaissent ou parfois passent latéralement, eux-mêmes, à une faible épaisseur de dolomies, phénomène qui s'observe très nettement dans la région du Djebel Ali ben Salah et de Zemlet Darhmouss (G. BUSSON, 1967). Finalement, sur la province septentrionale, l'équivalent des gypses de la Mestaoua est constitué par une série mince, quasi uniquement dolomitique (dolomie informe).

Source : MNHN, Paris

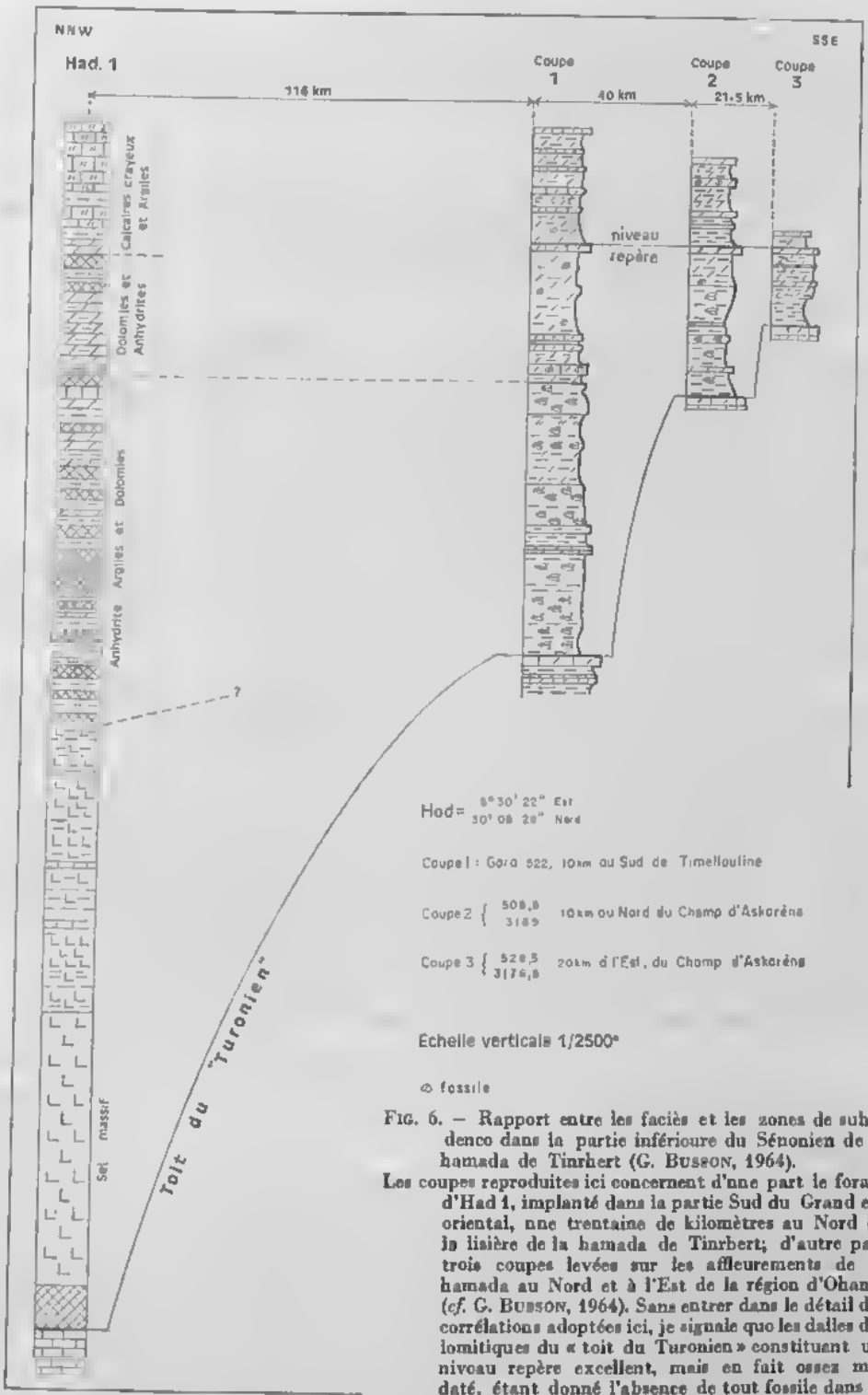


FIG. 6. — Rapport entre les faciès et les zones de subsidence dans la partie inférieure du Sénonien de la hamada de Tinrhert (G. BUSSON, 1964).

Les coupes reproduites ici concernent d'une part le forage d'Had 1, implanté dans la partie Sud du Grand erg oriental, une trentaine de kilomètres au Nord de la lisière de la hamada de Tinrhert; d'autre part trois coupes levées sur les affleurements de la hamada au Nord et à l'Est de la région d'Ohanet (*cf.* G. BUSSON, 1964). Sans entrer dans le détail des corrélations adoptées ici, je signale que les dalles dolomitiques du « toit du Turonien » constituant un niveau repère excellent, mais en fait assez mal daté, étant donné l'absence de tout fossile dans la série évaporitique sus-jacente. La masse anhydritique d'Had 1 doit évidemment être rapprochée des gypses et argiles à gypse du Sénonien du Tinrhert (gypses de Timellouline *auctorum*); les carbonates sus-jacents de ces différentes coupes sont également à mettre en parallèle.

On notera les faits suivants. Dans l'ordre de solubilité décroissante des sels examinés : le sel gemme se cantonne strictement à la zone la plus subsidente (Had 1), où il est présent pratiquement pur — hormis des intercalations d'argiles — sur plus de 250 m de série. Anhydrite et gypse existent en abondance pour une certaine valeur de la subsidence; mais au-dessous d'un certain seuil, ces sulfates à leur tour disparaissent, ne laissant place qu'aux carbonates et aux argiles. En même temps, l'on découvre dans la série argileuse de base, très amincie, une certaine fraction détritique, trait tout à fait original dans ce Sénonien inférieur.

Source : MNHN, Paris

à certaines époques, l'individualisation de fosses, par enfoncement du plancher sédimentaire le long de flexures et entre celles-ci, permet la rétention d'eaux denses hypersalines jusqu'à amener la précipitation des sels pour cette raison localisés dans les fossés. Lorsque cesse l'approfondissement de ces fosses, c'est-à-dire lorque la subsidence s'uniformise sur l'ensemble du bassin, la circulation et le brassage de l'eau deviennent très généraux : c'est alors la phase étale, qui se marque par une sédimentation carbonatée généralisée. On retrouve ainsi, dans le détail même des dépôts, un mécanisme analogue à celui que l'on a constaté à une échelle beaucoup plus vaste et qui fait alterner les grandes époques salifères à subsidence différentielle importante (Salifère principal par exemple) avec les époques carbonatées plus étales.

La disposition des sédiments du Sénonien du Tinrhert évoque des phénomènes identiques (fig. 6).

En réalité, d'autres hypothèses ont été émises pour expliquer cette disposition des sels de solubilités différentes : il s'agit de la théorie désertique et de sa variante connue sous le nom de théorie de la descente. Dans l'une aussi bien que dans l'autre, on admet que les sels ont précipité sur l'ensemble du domaine sédimentaire, et partout sous très faible profondeur d'eau. La subsidence différentielle n'a introduit de différences qu'*a posteriori* et de la manière suivante : dans la partie la plus subsidente, les sels soustraits au fur et à mesure du dépôt aux actions météoriques se sont conservés et se sont accumulés en masses importantes. Au contraire, sur les zones marginales, résistantes à la subsidence, les sels qui se sédimentaient sporadiquement, avaient toute chance d'être repris par l'érosion, en particulier d'être lessivés par les eaux de pluies et de ruissellement et d'être transportés dans les parties centrales du bassin, encore en subsidence. D'où, d'après ces théories, le fait que les sels les plus solubles se cantonnent aux zones subsidentes. Nous allons voir que le deuxième cas que je vais évoquer maintenant ne paraît pas compatible avec ces hypothèses.

2. *Les sels les plus solubles passent, en masse, à des sels moins solubles.* Le deuxième cas correspond, par exemple, aux observations qui ont pu être faites sur le Salifère principal. Je n'en rappellerai qu'un des traits essentiels : à une zone septentrionale moyennement épaisse et surtout anhydritique s'oppose une province centrale, plus épaisse, uniquement salifère — ou argilo-salifère, mais nullement anhydritique. Ici la théorie de la descente ne saurait s'appliquer, car la région la moins subsidente ne se caractérise pas par une lacune des évaporites, mais par la substitution d'un sel moins soluble — anhydrite — à un sel plus soluble — sel gemme. Le manque d'anhydrite dans la région subsidente ne peut être imputé à une dissolution : *les différences de faciès sont d'origine* et ne sont pas dues à des remaniements. Ainsi tend à se trouver confirmé le rôle de la subsidence différentielle dans la séparation des différents sels [1].

2. *Rappel de dispositifs analogues extra-sahariens.*

Les exemples que fournit le Mésozoïque saharien sont particulièrement grandioses, mais ils sont loin de représenter des cas uniques ou même isolés. En Afrique du Nord, des coupes particulièrement démonstratives ont été publiées par P.F. Burollet (1956), concernant le Crétacé et le Nummulitique de Tunisie : en particulier, la figure 91 publiée par cet auteur et rappelée ci-contre (fig. 7) montrant la disposition des faciès du Nummulitique du Sud du Sahel, entre Maknassy et Sfax; la figure 92 avec la répartition du gypse dans les coupes de la formation Zebbag (Cénomanien et Turonien inférieur) du sillon de Gafsa. Par ailleurs, P.F. Burollet fournit des schémas très clairs de la « répartition théorique des évaporites dans différents types de bassins intracratoniques », faisant appel à la fois aux exemples tirés de sa région d'étude et également au Crétacé supérieur de la région de Touggourt, au Nummulitique des Ouled Djellal et du Sud-Est constantinois, etc. De cette liaison entre les évaporites et les fortes épaisseurs, cet auteur déduit que « la concentration (des sels) se produit à des degrés nettement moindres s'il n'y a pas rétention des eaux plus denses dans un bassin plus profond que la plate-forme... Le cas le plus fréquent est celui d'une zone subsidente assez limitée au

1. En fait, ce cas est particulièrement complexe, car la zone à anhydrite, si elle est la moins subsidente, est en même temps la plus septentrionale, c'est-à-dire la plus proche de la Mésogée et la répartition de l'anhydrite et du sel peut être expliquée aussi par une ségrégation progressive des sels en fonction de l'éloignement de la mer libre... (voir ci-dessous).

Source : MNHN, Paris

sein d'une plate-forme relativement stable occupée par une mer peu profonde : dans ce cas, les couches de gypse ou de sel se forment exclusivement dans le secteur d'approfondissement... *Il semble que la concentration et la cristallisation aient lieu essentiellement au bord des flexures* où descendraient les eaux denses et que le milieu du bassin, peut-être renouvelé par

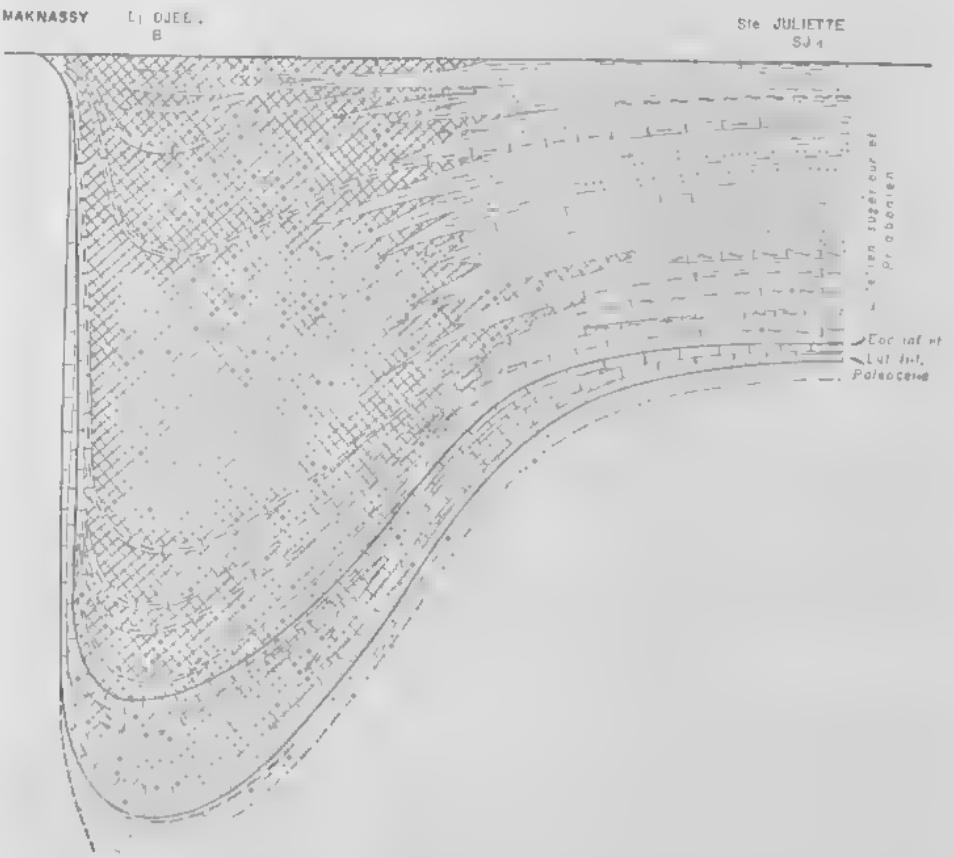


FIG. 7. — Interprétation stratigraphique du Nummulitique du Sud du Sahel, entre Maknassy et Sfax, d'après P.F. BUROLLET (1956, fig. 91, p. 286). L'échelle verticale a été amplifiée 10 fois par rapport à l'horizontale. Tandis que les épisodes carbonatés apparaissent comme des phases étales et généralisées, les gypses se cantonnent strictement à la zone subsidente, passant en général sur les bordures à une série argileuse amincie.

des mouvements de convexion, reçoive plutôt des sédiments carbonatés (dolomies primaires) et clastiques fins (argiles plastiques pouvant avoir des teneurs en sels assez fortes » (*op. cit.*, p. 284-285).

Des observations moins systématiques mais du même genre avaient été faites çà et là en Afrique du Nord. J. FLANDRIN (1948, pl. II), synthétisant de nombreuses observations sur le Sud constantinois et le Nord du Sahara, a donné un schéma reproduit ci-contre (fig. 8) qui met admirablement en évidence les rapports entre l'accroissement de la subsidence et l'importance des évaporites, en l'occurrence la série gypseuse épaisse du Lutétien — et de l'Eocène supérieur — nord-saharien. Au Nord de Colomb Béchar, la série supra-turonienne permet des observations pleines d'intérêt : quelques dizaines de mètres d'argiles rouges sableuses, à petits bancs de gypse et de calcaires lacustres, visibles à l'affleurement, passent à plus de 700 m de formations principalement évaporitiques au sondage S 1 ; cet accroissement d'épaisseur correspond en particulier à l'apparition de plus de 500 m de sel gemme (P. DELEAU, 1952, p. 58). Nouvel exemple de cette liaison entre les évaporites et l'existence d'une subsidence différentielle importante. Dans le département d'Alger, le Cénomanien des Hauts Plateaux entre Boghari et Djelfa montre également une évolution intéressante : du Nord vers le Sud, on note successivement un domaine relativement peu épais et calcaire (région de Guelt es Stel), une

Source : MNHN, Paris

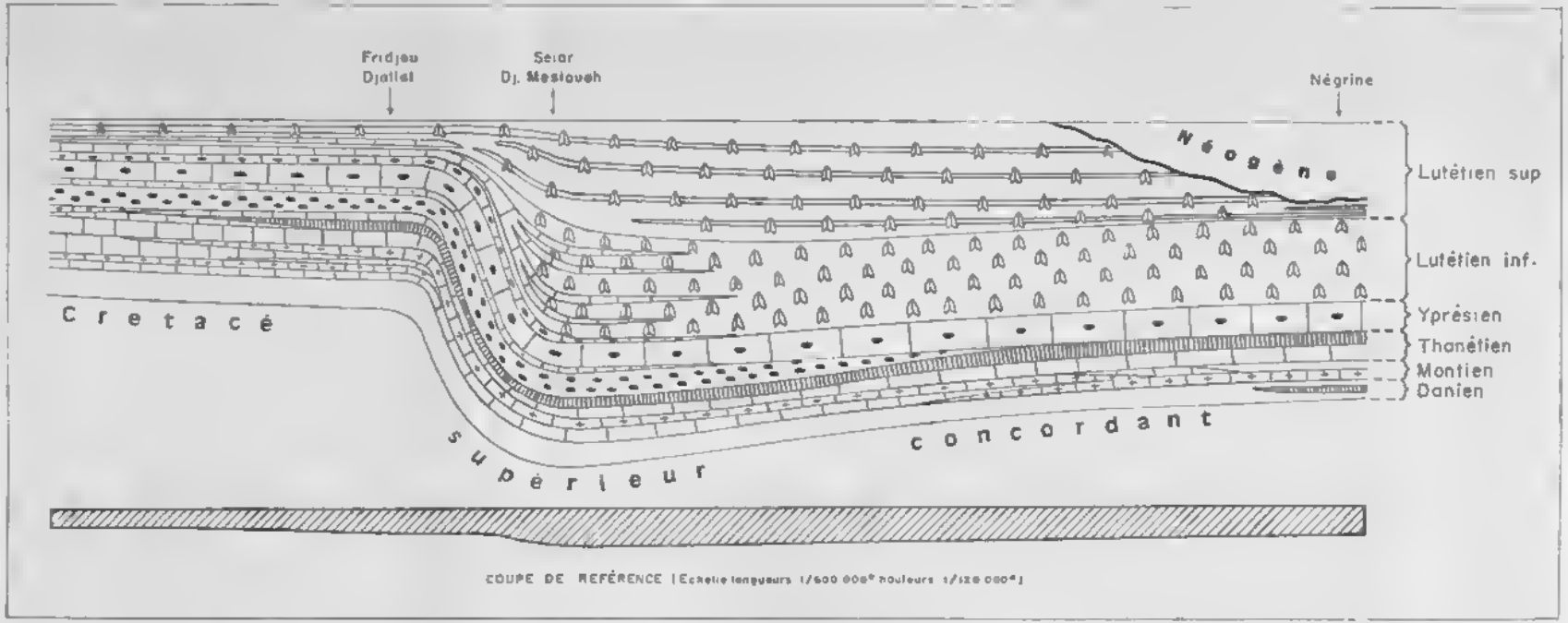


FIG. 8. — Coupe de l'Éocène des confins de la Berbérie et du Sahara dans l'Est du département de Constantine, d'après J. FLANDRIN (1948, pl. 2). On notera en particulier au niveau du Lutétien la liaison entre la subsidence et les faciès gypseux jusque dans la zone de flexure qui délimite la province subsidente. (La partie supérieure admet vraisemblablement de l'Éocène supérieur.)

Source : MNHN, Paris

zone d'épaississement rapide où les gypses tendent à se généraliser (région d'Hassi-Baba); enfin, la province de l'Atlas saharien aux épaisseurs fertes et aux faciès marneux, et secondairement calcaires. Il s'agit donc là du modèle de dispositif dans lequel *les évaporites se cantonnent à la zone flexurée* où débutent les épaississements [1].

Des cas analogues se retrouvent évidemment ailleurs qu'en Afrique du Nord. Le premier exemple sera pris dans le bassin de Paris : une carte de faciès de la base du Ludien récemment publiée (Ch. POMEROL et L. FEUGUEUR, 1968, fig. 9, p. 19) qualifie ainsi la zone gypseuse : « zone de subsidence — dépôt de gypse ». Plus caractéristique est l'exemple du Trias du Nord de l'Aquitaine. F. DALBIEZ (1963) a décrit les séries de bordure (gréseuse, inférieure; carbonatée, moyenne; argileuse, supérieure) et il a décrit, grâce en particulier aux données de forage, l'évolution vers le centre du bassin : en même temps que le Trias s'épaissit considérablement, l'individualité des trois séries disparaît. Les grès et les dolomies font place à l'anhydrite puis au sel. « Notons toutefois que ce n'est qu'à partir d'une certaine épaisseur globale de la formation, de l'ordre de 300 m, que le sel apparaît ». Dans le domaine complètement différent que représentent les Alpes, des faits analogues ont été signalés : c'est ainsi qu'il a été décrit (J. SARROT RAYNAUD, 1963), sur les bordures du dôme de la Mure, une grande épaisseur de sédiments souvent évaporitiques (gypse, anhydrite et dolomie), « qui ne sont plus représentés sur le dôme que par de minces lits de schistes » [2].

Enfin, je rappellerai les observations de L.L. SLOSS portant sur de nombreux exemples situés en Amérique et répartis dans toute la série stratigraphique, paléozoïque et mésozoïque. Les conclusions de cet auteur aboutissent à lier le dépôt des évaporites à l'importance de la subsidence. *In the general case, the initial normal marine phase is expressed by a sheet of limestone which gives little evidence of tectonic differentiation of the area covered. The penesaline phase is normally characterized by marked isopach rates of change which reflect the differentiation into shelves and basins with hinge lines and platforms. These tendencies are increasingly manifest in the saline stage, and supersaline conditions appear to have been attained only in those areas of extreme disparity of tectonic states.*

En conclusion, l'observation des évaporites, en particulier celles faites à la faveur des sondages profonds, montre une liaison tout à fait fréquente entre les évaporites et la subsidence : à tel point que, comme le rappelle H. BORCHERT (1965, p. 256), les sels les plus solubles sont parfois qualifiés de faciès synclinaux (*basin ou syncline facies*) et les sels les moins solubles de faciès anticlinaux (*uplift* ou *anticline facies*). Plus précisément, il semble parfois que les sels de plus en plus solubles sont déposés dans des zones successives, de plus en plus subsidentes. On a pu se demander si l'intervention de phénomènes de lessivage ou de remaniements divers suffisait à expliquer une telle répartition, qui s'avère souvent d'origine. Dans le détail, les accumulations d'évaporites apparaissent parfois préférentiellement localisées sur les zones de flexures qui ont joué, dès la sédimentation, séparant le domaine très subsident du domaine résistant. *Bref, certains auteurs n'ont pu échapper à l'idée que les évaporites et spécialement le sel gemme, peuvent être des dépôts plus profonds que les carbonates auxquels ils passent latéralement.* Une telle conclusion s'oppose formellement à des notions classiques, encore couramment enseignées et servant de base, dans la grande majorité des cas, aux reconstitutions paléogéographiques bâties sur l'observation de la lithologie : l'apparition d'évaporites dans une série étant très généralement interprétée comme l'indice d'une diminution maximale de la profondeur de dépôt.

b. SÉDIMENTATION SALINE ET VITESSE DE SUBSIDENCE.

Il s'agit là d'arguments apportés au dossier de la profondeur de dépôt des évaporites par l'étude des sels du Zechstein germanique (G. RICHTER-BERNBURG, 1950).

---

1. Ce dernier exemple est extrait du cours inédit de Géologie régionale professé par M. R. LAFFITTE à la faculté des Sciences d'Alger, année scolaire 1956-57.

2. La conclusion de J. SARROT RAYNAUD, selon laquelle les évaporites de la périphérie du dôme de la Mure correspondent à une moindre subsidence, me paraît présenter un caractère paradoxal eu égard aux faits exposés. Mais les interprétations ne sont pas ici en cause.

Source : MNHN, Paris

A vrai dire, le rapprochement entre les stratifications fines des différents termes des gisements salifères et les « alternances annuelles » (« *Jahresringe* » des auteurs germaniques) a été fait depuis longtemps. G. DEICHA (1944) par exemple a évoqué ce sujet en s'appuyant sur les figurations qu'a données V. MAIKOVSKY (1941, *in* Deicha) traitant des couches oligocènes d'Alsace. Le fait primordial mis en évidence par ces enregistrements annuels est l'extrême rapidité de cette sédimentation salifère. « Il est certain que ni la sédimentation détritique, ni la sédimentation organique ne nous a habitués à des rythmes aussi rapides », écrivait déjà G. DEICHA en 1944. Mais au cours de ces études, G. DEICHA a seulement cherché à évaluer l'évaporation nécessaire pour rendre compte de telles précipitations; et il a constaté que les quantités d'eaux évaporées étaient tout à fait plausibles eu égard aux mesures effectuées dans la nature actuelle (Kara-Bogaz, Mouïghab). Il ne semble pas que l'on ait songé à cette époque à comparer cette vitesse de sédimentation *aux vitesses de subsidence* telles que l'on peut les estimer de différentes façons.

Dans le Zechstein germanique, des observations extrêmement abondantes et très minutieuses ont permis également d'interpréter les fines successions qui apparaissent dans les sels, comme la répercussion de fluctuations climatiques saisonnières (ensoleillement, rythmes de température, pluviosité). Davantage, plusieurs milliers de mesures de rythmes effectuées dans les roches salines permettent de conclure que le cycle des taches solaires, d'une durée de 11 ans, a affecté le dépôt du sel. Ces rapprochements et les comptages faits dans toute cette série ont permis de constater que les bancs épais de roches salines et les bancs de potasse se sont déposés sur de très courtes périodes. Plus précisément, 150 à 200 m de chlorures de la série de Werra se seraient déposés en une période de temps de l'ordre de 4 000 ans; et les 400 à 600 m de chlorures des séries de Stassfurt ne se seraient déposés qu'en un temps aussi bref que 6 000 à 8 000 ans [1].

Or, d'après G. RICHTER-BERNBURG, aucune subsidence notable ne peut avoir affecté ces bassins épicontinentaux pendant des phases aussi brèves. En effet, selon cet auteur, les grandes phases d'accumulation des évaporites furent des périodes anorogéniques, succédant aux cycles orogéniques; et, pendant ces temps anorogéniques, la vitesse de subsidence de bassins épicontinentaux et de régions affectées de tectonique germanotype peut être estimée à un maximum de 0,1 à 1 mm par an [2]; valeurs tout à fait insuffisantes pour produire dans les intervalles de temps énumérés l'épaisseur correspondant aux dépôts de chlorures.

La conclusion de G. RICHTER-BERNBURG découle logiquement de ces prémices : les bassins dans lesquels s'accumulèrent les plus connus des sels permiens doivent avoir existé comme *bassins profonds avant même le début de la précipitation du sel.* H. BORCHERT (1965, p. 232), exposant cette théorie, précise : « *During the few thousand years over which the main chloride deposits were forming, very little further sinking of the basin regions can have occurred in the German Zechstein. During such short time intervals,* only pre-existing depths *could be filled, predominantly with rock salt material* ».

De telles conclusions ont été adoptées sans réserves par A.J. PANNEKOEK (1965). D'après cet auteur, dans le cas d'épais gisements d'halite, une fosse a dû pré-exister — car la subsidence n'a pu être aussi rapide que la sédimentation saline — et, toujours d'après A. J. PANNEKOEK, cette déduction s'oppose aux théories de W. SUGDEN (1963), selon lesquelles les dépôts d'halite ont dû être engendrés dans un milieu comparable au golfe de Qatar, par conséquent sous une tranche d'eau extrêmement faible.

Nous voilà donc passés à l'autre extrémité des interprétations bathymétriques : il ne s'agit plus ici de considérer les dépôts salins comme les moins profonds de la série sédimentaire;

---

1. Déjà une objection vient ici à l'esprit : si l'on admet aisément que les *varves* salines permettent de chiffrer les années correspondantes, on voit mal comment ces couches auraient enregistré d'éventuelles interruptions dans la sédimentation. Et dans ces conditions, peut-on réellement exclure que le temps sur lequel s'est étalé le dépôt ait été beaucoup plus long que ce que donne le simple total des varves ?

2. Une deuxième objection peut être faite ici, portant sur le deuxième terme du raisonnement : qualifier le Zechstein de période anorogénique me paraît ressortir à une conception purement théorique des déformations, en particulier à une répartition discontinue de la tectonique en un certain nombre de phases privilégiées, apanage de certaines périodes exceptionnelles. L'observation de plus de 6 000 m de sédiments du Permien supérieur au Tebaga de Medenine ne m'incite pas à considérer ce système comme une période où ne s'exerça *a priori* aucune subsidence importante...

Source : MNHN, Paris

ou de suggérer que ces dépôts ont pu se faire dens un centre de bassin légèrement plus profond que les zones périphériques, sous l'effet d'une subsidence active; mais d'affirmer que toute l'épaisseur du sel pré-existait, le plancher sédimentaire individualisant une fosse, et que les dépôts salins n'ont fait que combler cette fosse. Je ne reviendrai pas sur les réserves que j'ai émises en exposant les différentes perties de cette interprétation.

2. *Les observations faites dans la nature actuelle et les hypothèses explicatives.*

a. Les hypothèses théoriques et les constatations expérimentales.

L'interprétation du schéme euquel mènent les interprétations « profondes » des évaporites peut, en somme, se résumer comme suit : les saumures sont d'autant plus lourdes qu'elles sont concentrées. Au cours du cheminement qu'elles parcourent, des plus faibles aux plus fortes profondeurs, elles déposent successivement des sels de plus en plus solubles : carbonates, gypse ou anhydrite, sel gemme; dans les parties les plus profondes arrivent les saumures les plus concentrées qui peuvent même précipiter, dens certains cas, les sels potassiques. Il faut préciser que ces interprétations et ce schéma n'ont pas reçu l'approbation générale. Des considérations théoriques ont été opposées à un tel mécanisme et certains auteurs le jugent difficilement réalisable. C'est ainsi que dans la discussion qui a suivi un exposé de M. J. Ricour sur les évaporites (Association des sédimentologistes français, réunion tenue à Orsay le 20 novembre 1964, p. 18), on peut lire : « M. Lucas s'inquiète de savoir comment, dens l'hypothèse émise par L.L. Sloss, une saumure lourde, après avoir coulé au fond d'un bassin, peut continuer à se concentrer alors qu'elle n'est plus en contact avec l'etmosphère ». En fait il n'est pas certain que les difficultés einsi évoquées aient reçu une solution setisfaisante du point de vue théorique et expérimental ou grâce à l'observetion de modèles réels dans le nsture.

O. Braitsch (1962) et H. Borchert ont étudié ces problèmes à le fois expérimentalement et par les lois de la thermo-dynamique. Ils ont noté que l'observetion de certaines conditions naturelles donne à penser qu'il peut exister des *gradients* considérebles de *température* et de concentration dans les grandes masses d'eau : en particulier, les profondeurs des bassins sont en général, en même temps, les portions les plus froides. Par ailleurs, ces auteurs ont rappelé l'existenco de sels différents quent à leur comportement à l'égerd de la température : les sels *cryophiles* ayant un « coefficient de température de solution » positif cristallisent préférentiellement dans les perties les plus froides de la solution; les sels *thermophiles*, doués d'un « coefficient de température de solution » négatif tendent eu contreire à se former dens les perties les plus chaudes de le solutiou. Parmi les premiers, on citera la carnallite, la sylvine, l'epsomite, l'hexahydrite, la schoenite, etc.; parmi les seconds, le gypse et l'anhydrite, la kainite, la langbeinite, le thenardite, etc. Certains sels, et en pertieulier l'halite, font partie, soit des minéraux cryophiles, soit des minéreux thermophiles, selon le composition de la solution qui les contient : dens le cas précis où l'esu de mer se concentre per éveporation, tant que la saturation en chlorure de potassium n'est pas etteinte, le ClNa possède un « coefficient de température » très faiblement positif. A titre d'exemple, quend une solution saturée en ClNa à 100° se refroidit jusqu'à 20 °C, 5,5 molécules de ClNa sont précipitées sur les 60,5 existantes au départ.

Pour examiner l'application de ces notions, les euteurs ont considéré un système placé dens des conditions « dynamique-polythermales » : c'est-à-dire que la tempéreture variait d'une extrémité à l'autre du bassin d'expérimentation, induisant des courants de concentration et de convection. Et les précipitations et cristallisations obtenues différaient effectivement de celles du système statique, considéré en particulier par Vant' Hoff, D'Ans *et al.* Aussi les auteurs se sont-ils cru autorisés è appliquer ces phénomènes à l'interprétation des gisements évaporitiques. Les solutions réchauffées [1] et concentrées en surfece jusqu'à seturetion par évaporetion ecquièrent une densité élevée qui les emène au fond du bassin. Là, par échange de température avec les solutions perticulièrement froides du fond, cette solution concentrée se

1. Les solutions saturées en KCl ou en NaCl ont une densité d'autant plus forte que leur température est plus élevée.

Source : MNHN, Paris

refroidit elle-même et donne lieu, *ipso facto*, à une précipitation de minéraux cryophiliques» sel gemme par exemple. Au contraire, le gypse précipite de préférence par réchauffement, dans les régions plus plates des bassins.

Une solution de ce type est prônée et adoptée sans la moindre restriction par O. BRAITSCH dans l'interprétation des gisements salifères et potassiques du Zechstein germanique : « A part les variations dans la température, on ne connaît aucun autre mécanisme suffisant pour amener la séparation entre KCl et NaCl dans des solutions naturelles de sels. Le refroidissement ne doit pas être rattaché à des variations saisonnières... Il est bien plus plausible d'admettre que le refroidissement de la solution est dû à l'*écoulement dans une partie plus centrale et plus froide du bassin* (p. 167)... La précipitation a lieu lors de la descente de la solution dans les profondeurs plus froides du bassin » (p. 169). Cependant, d'autres spécialistes ont fait un accueil beaucoup plus réservé à ces théories. Ainsi F.H. STEWART (1963, p. y25) porte sur ces études « dynamique-polythermales » le jugement suivant : « *Borchert used these results to explain some facies changes in potash mines in Germany... However, there is still considerable doubt as to how far such conditions can apply to natural deposits of marine evaporites* ». Il nous reste à examiner dans quelle mesure ces mécanismes semblent être réalisés dans la nature actuelle.

b. LES OBSERVATIONS FAITES DANS LA NATURE ACTUELLE.

L'affirmation selon laquelle des processus analogues — concentration de saumures salines dans les parties profondes des bassins et éventuellement dépôt d'évaporites — se produiraient dans les mers actuelles a été souvent émise. Ainsi, on relève dans la discussion qui suit l'exposé de M. J. RICOUR (Association des Sédimentologistes français, 1964, p. 18) : « M. A. JAUZEIN fait remarquer qu'à l'heure actuelle, dans le golfe Persique, la superposition d'eaux de salure moyenne à des eaux très salées en profondeur est une chose très courante ». D'autre part, dans le récent manuel de R. BROUSSE (1968) : « Les mers continentales situées sous climat aride... (Méditerranée, golfe Persique, mer Rouge et golfe de Californie) peuvent être le siège de sédimentation saline lorsque leurs eaux profondes ne se renouvellent pas ». En fait, on peut se demander si ces affirmations sont suffisamment fondées. Les travaux des océanographes mettent parfois en évidence une augmentation de la salinité en profondeur (A.C. NEUMANN et D.A. Mc GILL, 1962), mais cette augmentation est tout à fait minime eu égard aux concentrations nécessaires pour obtenir la précipitation de sel. A ma connaissance, un seul cas fait exception et j'évoquerai rapidement les connaissances que nous en avons.

1. *Les saumures profondes de la mer Rouge.*

On sait que deux des fosses de la mer Rouge situées vers 2 000 m de fond, l'une appelée *Discovery*, l'autre *Atlantis II* — du nom des navires hydrographiques les ayant reconnues — présentent des particularités océanographiques et sédimentaires tout à fait remarquables. Tout d'abord du point de vue océanographique, la température et la salinité y augmentent de manière brutale et extraordinaire. En effet, alors que la température décroît de 30 à 22°, depuis la surface jusqu'à 200 m du fond (A.C. NEUMANN et D.A. Mc GILL, 1962), un accroissement de près de 20° a été constaté dans les derniers 150 m, puisque des températures de 44° ont été signalées dans ces fosses. Il en est de même de la salinité : celle-ci se maintient aux alentours de 40 ‰ de la surface à 200 m du fond et, là, passe à une valeur excédant 270 ‰. Du point de vue sédimentaire, il a été découvert dans ces fosses des dépôts exceptionnels, très différents de ceux qui tapissent le reste du fond de la mer Rouge — y compris les autres fosses — et sur lesquels je ne m'étendrai pas puisque, au demeurant, il ne s'agit pas d'évaporites.

Faut-il considérer ces masses d'eaux salines, comme le modèle enfin réalisé par la nature du schéma imaginé dans les « interprétations profondes » des évaporites ? Un auteur au moins l'a pensé (CHABNOCK *in* J.C. SWALLOW and J. CREASE, 1965), puisqu'il a suggéré que ces eaux pourraient avoir été concentrées par évaporation dans les régions côtières chaudes et peu profondes et s'être écoulées ensuite, comme un courant lourd, dans la fosse où elles ont été découvertes. En réalité, cette hypothèse ne paraît pas satisfaisante : d'une part, il y a le fait que des eaux d'une telle densité ne sont pas signalées dans les aires marginales de la mer Rouge; d'autre part, il semble improbable qu'elles aient pu traverser 100 km de fonds marins sans

Source : MNHN, Paris

avoir été mélangées et diluées par l'effet de courant de turbulence; enfin et surtout les études chimiques menées par J.C. SWALLOW et J. CREASE ont montré que ces saumures anormales ne pouvaient être de l'eau de mer concentrée par évaporation, car le rapport des principaux ions, aussi bien que le rapport chlorinité/conductivité, diffèrent de manière significative de celui de l'eau de mer normale. On sait que les auteurs ayant étudié les saumures de ces fosses et leur environnement sont arrivés à la conclusion qu'il s'agit là d'eaux « connées ». L'origine peut en être représentée par l'eau interstitielle de sédiments anciens ou par l'eau de cristallisation de séquence évaporitique sous-jacente. La conclusion qui s'impose, de toute façon, aboutit à une différence irréductible entre les saumures de ces fosses et le schéma correspondant à l'origine *profonde* des évaporites.

2. *Les enseignements de la mer Morte.*

Je finirai cette revue rapide de quelques cas de milieux actuels par l'évocation de la mer Morte, dont certaines caractéristiques sont du plus haut intérêt, utilisant principalement pour cela la récente étude de D. NEEV et K.O. EMERY (1967). La forme du fond et la profondeur de cette mer amènent à distinguer deux bassins différents :

1. Le bassin du Sud, où la tranche d'eau n'excède pas 6 m, contient une eau plus salée — de 2 à 6 g/l — que celle du bassin du Nord : la plus faible profondeur permet en effet aux eaux de ce bassin du Sud de devenir plus chaudes pendant la saison estivale, et de subir, de ce fait, une évaporation plus importante qui amène une salinité supérieure. Parmi les caractères sédimentaires de ce bassin du Sud, la présence d'oxygène dans les eaux de fond est révélée par la couleur brune des dépôts actuels.

En ce qui concerne les dépôts d'halite, ils sont quantitativement très peu importants et ne sont signalés que dans des lagunes peu profondes de la côte occidentale. Ils se produisent soit sous la forme de champignons de sel, soit sous la forme de croûte. Il est à noter que ces dépôts ne précipitent que dans des lagunes exceptionnellement peu profondes, les champignons de sel — hauts de 3 à 6 cm — atteignant fréquemment la surface de l'eau. La cristallisation du sel se fait après une période d'évaporation intense et au cours de matins froids, sous la forme d'un film flottant de cristaux rectangulaires d'halite : la désagrégation de ce film sous l'effet du vent alimente la croissance des champignons qui finissent, en devenant coalescents, par former une croûte continue.

2. Le bassin du Nord est plus profond et d'une variété hydrologique qui le rend plus intéressant. Plusieurs masses d'eaux différentes y ont en effet été reconnues : 1° La masse d'eau supérieure, épaisse de 40 m environ, se scinde elle-même en deux sous-groupes : *a.* Le membre de surface dont l'épaisseur et les propriétés varient de façon saisonnière, car elles sont affectées par le ruissellement, l'évaporation, la chaleur solaire, les courants, etc.; *b.* Le membre intermédiaire, aux eaux plus froides que les eaux de surface, sauf en décembre et en janvier. La salinité de l'ensemble de cette masse d'eau supérieure est de 289 à 290 g/l; 2° La masse d'eau inférieure s'étend jusqu'au fond et comprend également deux sous-groupes : *a.* Le membre de transition qui va de 40 à 100 m, montre un accroissement progressif de la température, de la densité et de la salinité; *b.* Le membre profond, enfin, au-dessous de 100 m, est caractérisé au contraire par des propriétés uniformes jusqu'au fond du bassin, indépendantes de la température atmosphérique et de la saison. Dans tout ce membre profond, la température est légèrement supérieure à 21 °C, la densité à 1,230 et la salinité à 320 g/l. En ce qui concerne cette dernière, la saturation est donc atteinte.

Comment sont interprétés ces différents corps et quelles sont les relations existant entre eux, d'après les observations de tous genres effectuées dans ce bassin ? La masse d'eau inférieure, saturée, a laissé déposer jusqu'à une période relativement récente — un millier d'années — du sel gemme, alors qu'elle n'était pas encore recouverte par la masse d'eau supérieure et que le régime d'évaporation l'emportait sur la somme des précipitations et du ruissellement : ceci est attesté par la présence, au-dessous de la profondeur 40 m, d'épais dépôts d'halite, sous-jacents aux boues récentes et actuelles. *Le dépôt d'halite a cessé quand la masse d'eau supérieure, moins concentrée, est arrivée, s'est accumulée, scellant et isolant de l'atmosphère la masse d'eau inférieure.* Désormais celle-ci, sans contact avec l'atmosphère, est un corps d'eau

Source : MNHN, Paris

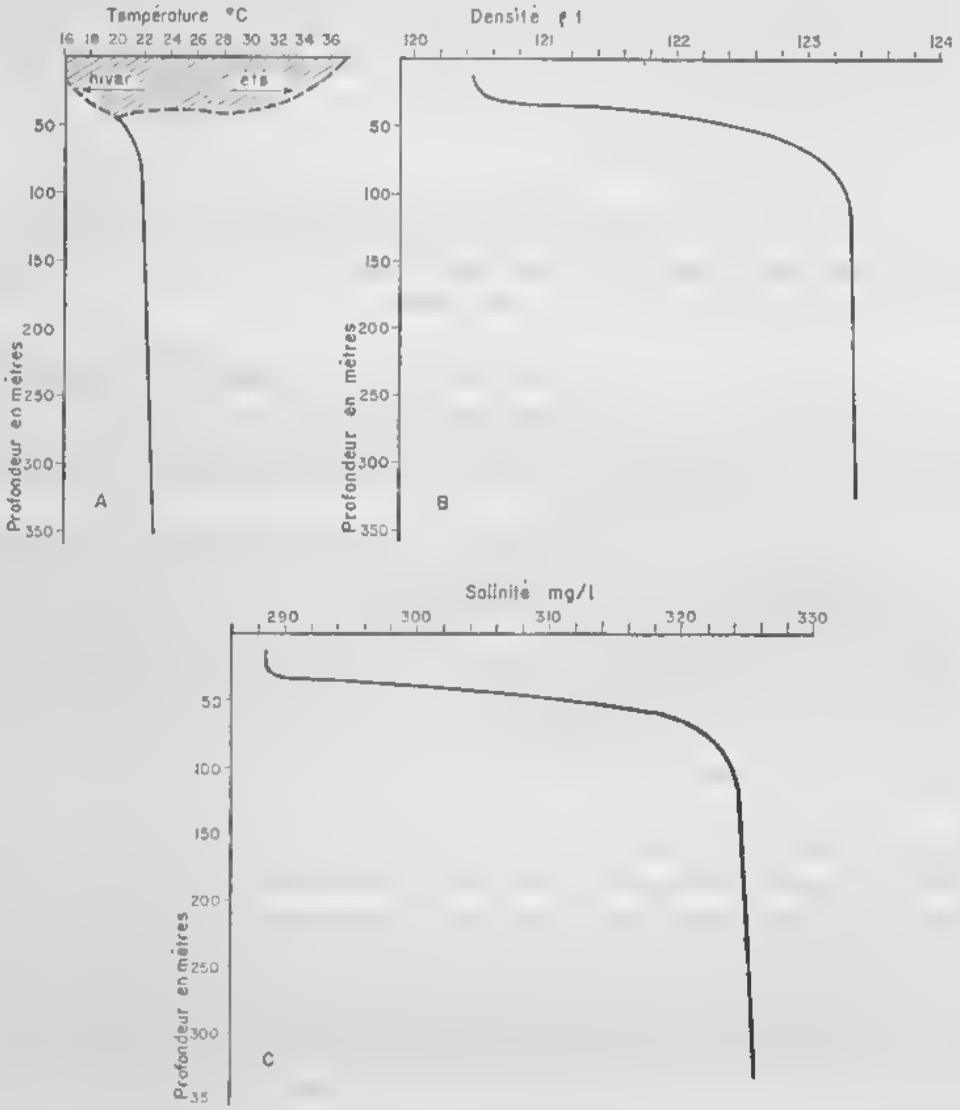


FIG. 9. — Distribution verticale de la température, de la densité et de la salinité dans le bassin du Nord de la mer Morta entre la profondeur 0 et 330 mètres, d'après D. NEEV et K.O. EMERY (1967, fig. 33, simplifiée et schématisée). Les répartitions de ces valeurs contribuent à individualiser les différents *corps d'eau* superposés dans la mer Morte.
Dans le dessin B, le long de l'échelle des densités lire 1,20, 1,21, etc.

Source MNHN, Paris

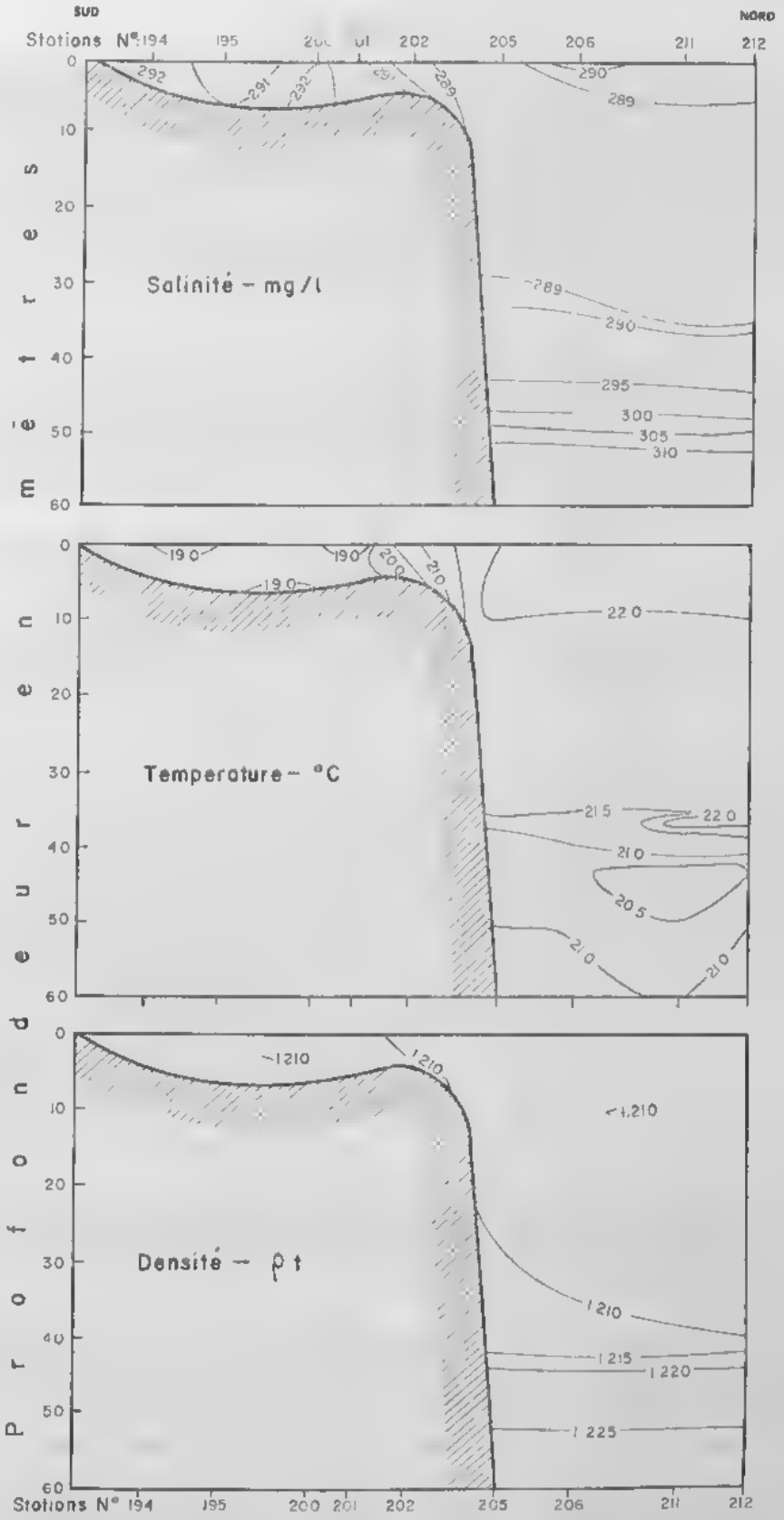


FIG. 10. — Profil longitudinal de la mer Morte montrant la répartition des valeurs de salinité, de température et de densité dans le bassin du Sud et dans les 60 premiers mètres du bassin du Nord, d'après D. NEEV et K.O. EMERY (1967, fig. 36). On perçoit très nettement les différences très accusées qui séparent les masses d'eau supérieure et inférieure du bassin du Nord, la limite se situant aux alentours de la cote — 40.

Source : MNHN, Paris

fossile; en particulier, *il ne prend aucune part au réseau de circulation de la masse supérieure.* Le mouvement des différents ions a pu être établi avec une certaine précision : il ne confirme pas le moins du monde les hypothèses émises par les tenants de l'interprétation « profonde » des évaporites, selon lesquelles au fur et à mesure de l'évaporation les saumures concentrées coulent jusqu'à sursaturer les eaux les plus profondes et permettre qu'elles déposent des sels.

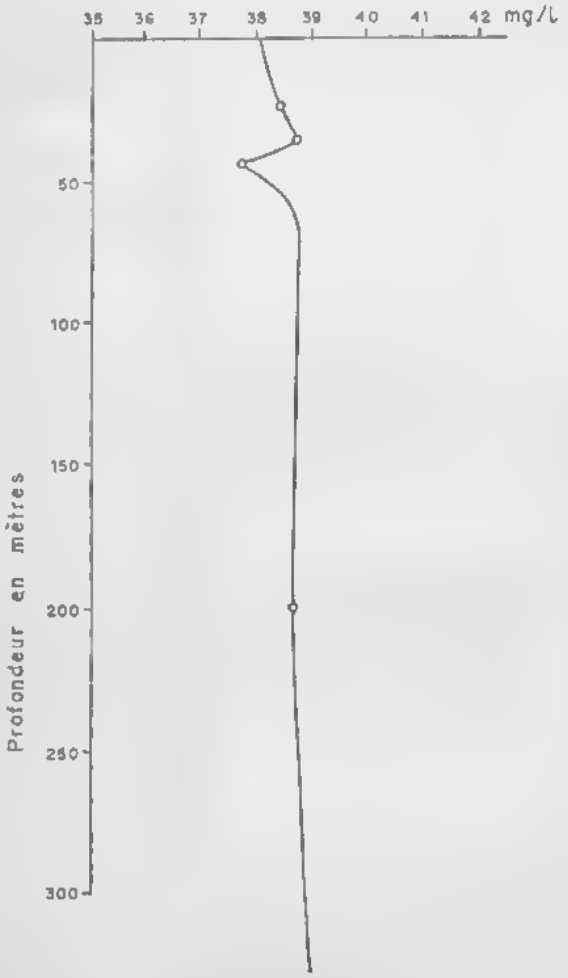


FIG. 11. — Courbe de la concentration du sodium en fonction de la profondeur dans le bassin du Nord de la mer Morte d'après D. NEEV et K.O. EMERY (1967, fig. 42).
Les apports de sel — en particulier en provenance du Jourdain — ne viennent nullement *sursaturer* la masse d'eau inférieure, corps d'eau fossile depuis que la masse d'eau supérieure l'isole de l'atmosphère. En réalité, au contraire, la masse d'eau inférieure ne fait que perdre, par diffusion, des ions sodium à sa partie tout à fait supérieure, au profit de l'eau sus-jacente : d'où le minimum qui s'observe légèrement au-dessus de la cote 50.

En fait, le schéma réalisé est le suivant : les circulations d'eau se font surtout sous l'effet de changement de densité, eux-mêmes amenés par les changements de température et l'évaporation superficielle. Étant donné l'importance du rythme des saisons dans ces facteurs, le mouvement de brassage (*overturn auctorum*) a un caractère annuel. Mais il n'affecte que la masse d'eau supérieure. Celle-ci se concentre bien — en particulier grâce aux sels apportés de façon ininterrompue par le Jourdain — mais cette concentration a pour seul résultat d'augmenter la teneur en sel de 0 à 40 m. La figure 11 montre cet accroissement pour l'ion sodium. Davantage, non seulement cet apport salin ne saurait s'introduire dans la masse d'eau inférieure pour la *sursaturer*, mais au contraire les observations de D. NEEV et K.O. EMERY prouvent que la masse inférieure perd des ions sodium *par diffusion* au profit de la masse d'eau supérieure.

Source : MNHN, Paris

D'où le minimum de concentration du sodium — très bien visible sur la courbe de la figure 11 — qui apparaît au toit de la masse inférieure, au sommet de ce qui est appelé le membre de transition (entre 40 et 55 m).

Bref, les spécialistes sont formels : pour qu'il y ait précipitation de sel, il faut que *toute la masse de la mer Morte soit arrivée à saturation*. A ce moment seulement, l'halite pourra effectivement cristalliser, couler sans être redissoute et enfin se déposer au fond. Mais dès lors que cette condition est *sine qua non*, on voit que toute condition bathymétrique disparaît : le dépôt d'halite se fera aussi bien à proximité de la cote 0, que par moins 400 m, comme cela s'est réalisé d'ailleurs dans un passé relativement récent.

3. *Conclusions.*

Il semble difficile, en définitive, d'admettre les hypothèses purement « profondes » de l'origine des évaporites, c'est-à-dire la possibilité qu'une masse d'eau profonde et sans relation avec l'atmosphère se concentre, se asture et finisse par déposer son sel. Cette conclusion, négative, ne signifie pas d'ailleurs qu'il faille refuser toute importance à la morphologie du plancher sédimentaire dans la genèse de ces sédiments. Je vais maintenant y revenir.

G. ESSAI DE SYNTHÈSE DE CES DONNÉES.

J'évoquerai d'abord dans ce paragraphe les idées classiquement admises dont j'ai essayé d'esquisser une critique ci-dessus, puis je passerai à celles qui me semblent rendre compte le moins malaisément des dépôts sahariens d'évaporites.

1. *L'indifférence bathymétrique.*

Les interprétations purement bathymétriques que tant d'auteurs ont voulu donner à la sédimentation des évaporites, ont oscillé entre deux pôles extrêmes : 1. Les évaporites, témoins des profondeurs minimales atteintes à certaines époques dans un bassin; 2. Les évaporites, dépôts de fosses profondes où se piègent les saumures hypersalines qui s'y concentrent jusqu'à saturation et cristallisation des sels. *Il semble que ni l'une ni l'autre de ces hypothèses ne puisse rendre compte à elle seule des gisements importants d'évaporites du passé. En particulier quand une masse d'eau se concentre par confinement, la précipitation peut avoir lieu dans toutes les tranches d'épaisseurs.*

Sur les vastes plates-formes du passé, la ségrégation des sels paraît placée sous d'autres influences que la seule profondeur de dépôt : je vais y revenir ci-dessous.

En pays plissé, le caractère discontinu des affleurements, les déformations tectoniques, les étirements et les bourrages contribuent à rendre extrêmement hypothétiques les reconstitutions paléogéographiques de tous ordres. En ce qui concerne l'interprétation des évaporites, la présence de tel ou tel sel est souvent utilisée pour essayer de déduire une estimation de la profondeur de dépôt. En fait, généralement, on peut estimer que ces déductions dépassent beaucoup les seules conclusions réellement fondées. L'observation, dans une partie limitée d'un bassin, de la présence de gypse dans une ou quelques coupes ne doit pas être interprétée automatiquement comme l'indice certain d'une profondeur de dépôt minimale et de conditions voisines de l'assèchement et de l'émersion. Ou, réciproquement, il ne faudrait pas qualifier systématiquement la province saline d'un bassin de « plus profonde » que la province gypseuse. Il semble que, dans ce domaine, on ne puisse avancer la moindre affirmation, avant d'avoir une idée précise de la répartition des sédiments (faciès et épaisseurs) dans *tout le bassin*. Les évaporites ne sauraient constituer, dans l'absolu, un sondeur et un enregistreur bathymétriques.

2. *Le rôle des facteurs tectoniques.*

J'ai souligné le caractère *quasi-miraculeux* de la persistance d'un seuil d'origine tectonique, qui fût capable de maintenir cette balance infiniment délicate exigée par le dépôt d'évaporites, et ceci pendant des périodes parfois très longues (Trias supérieur et Lias sabarien par exemple). En outre, cet appel à la tectonique me paraît un peu déplacé, dès lors que ces

Source : MNHN, Paris

grands dépôts évaporitiques se produisent en des lieux (plate-forme saharienne) et en des temps (Mésozoïque) pratiquement a-tectoniques. Certes, dans la nature actuelle, c'est en général grâce à des seuils topographiques qu'apparaissent concentration et gradient de salinité (Boccana de Virrila, Shark bay) : mais cette abondance relative de seuils ne fait que traduire un relief extrêmement accusé, dû à des actions tectoniques récentes, d'une ampleur tout à fait *extraordinaire*. Réciproquement, ces gradients de salinité ne se concrétisent jamais par des accumulations importantes de précipités. Une seule exception : le sel pléistocène de la mer Morte. Mais l'exception n'est qu'apparente, car si l'épaisseur de sel est importante dans le graben qui l'a piégé, l'extension latérale — limitée aussi au graben — est infiniment faible par rapport aux gisements de plate-forme du passé. Cette notion de *gisement de plate-forme*, d'ailleurs, s'impose d'elle-même, à la fois par les dimensions démesurées des dépôts, par l'extension prodigieuse de certains horizons-repères et par l'absence quasi totale de déformations tectoniques même actuellement; bref, tout milite en faveur d'une extrême platitude. Et, à mon avis, il y a une contradiction, dans ces conditions, à chercher une explication qui ne se trouve pas dans cette platitude même ; mais dans son contraire, à savoir dans la création et le maintien chronique d'un seuil topographique par l'activité tectonique.

3. *Évocation de quelques classifications structurales des gisements évaporitiques.*

Examinons dans quelle mesure quelques-unes des principales classifications structurales récentes des gisements évaporitiques (L.L. Sloss, 1953; N.M. Strakhov, 1967) peuvent être appliquées aux accumulations du Mésozoïque saharien. L.L. Sloss, dans un article désormais célèbre, a distingué les évaporites de centre de bassin (*intra-basin*) et les évaporites des marges de bassins. Les exemples sahariens examinés dans cette optique font ressortir le caractère un peu superficiel de cette classification et l'importance de l'*échelle* que l'on considère pour apprécier le « bassin ». En voici un exemple : à considérer le seul domaine de la plate-forme saharienne, la plupart des accumulations évaporitiques, par exemple le sel et l'anhydrite du Lias-Dogger, sont des gisements de centre de bassin; mais si l'on replace ces accumulations au sein d'un ensemble comprenant les régions mésogéennes ou simplement l'ensemble de l'Afrique du Nord et du Sahara, ces mêmes dépôts évaporitiques apparaissent comme dépôts de marges du bassin... D'ailleurs, le schéma de L.L. Sloss, destiné à illustrer le cas des « évaporites de centre de bassin », comprend toujours à sa périphérie le domaine « marin normal » que l'on peut considérer comme plus représentatif du centre du bassin que la zone pénésaline ou saline.

F.H. Stewart a donné récemment (1963) dans les *Data of Geochemistry* une mise au point sur les évaporites marines. Il affirme, en particulier, citant W.C. Krumbein (1951) : « *The largest deposits occur in intra-cratonic basin, but extensive evaporits have also been formed in epicontinental-shelf seas* ». Ces auteurs établissent donc une opposition entre les bassins intra-cratoniques et les mers de plate-forme épicontinentale. Le Mésozoïque saharien offre une succession d'exemples grandioses de mers de plate-forme épicontinentale occupant sinon une position parfaitement intra-cratonique, du moins une position centrale par rapport à des cratons occidentaux (craton du Grand erg occidental), méridionaux et orientaux (craton libyen).

N.M. Strakhov, par ailleurs, vient de publier (1967) une classification assez complexe des « formations halogènes arides » basées sur les « conditions géomorpho-tectoniques ». A vrai dire, les formations 3 et 4 de cette classification — à savoir respectivement les formations de baies marines et les zones marginales des bassins marins épicontinentaux — ne paraissent différer que par la taille et non par des caractères propres, justifiant la création de deux classes différentes. En outre l'auteur propose une distinction, au sein des formations de baies marines, entre un type *Kara Bogaz* où le bassin a une forme équidimensionnelle et les différents sels une répartition concentrique, et d'autre part un type *virila*, graben dont l'allongement fait un certain angle avec la côte et où les sels se répartissent des plus insolubles aux plus solubles en s'éloignant de la mer ouverte. Or les dépôts du Mésozoïque saharien mettent en évidence un bassin dont la forme est de type Kara-Bogaz, avec des dépôts répartis plutôt selon le type virila. Certes le fait qu'un modèle ne puisse s'introduire dans une classification ne prouve pas

Source : MNHN, Paris

pour autant le caractère inadéquat de cette classifiestion. Mais, en l'occurrence, on peut se demander si ces types correspondent réellement à des modèlca nettement différents, mais néanmoins moyens — ou bien s'ils ne correspondent pas, simplement, à des phénomènes extrêmes et particuliers; auquel cas il est exclu qu'ils puissent servir correctement de base à une classification. Il n'est pas de sciences naturelles sans classification, mais celles-ci n'ont d'intérêt que dans la mesure où elles dégagent et mettent en évidenco des types naturels, c'est-à-dire des types dont le plan d'organisation est réalisé par la nature plus volontiers que les plans intermédiaires entre ces types — et non précisément des cas extrêmes ou anormaux. Ceci est vrai à toutes les échelles et dans tous les domaines, depuis celui de la Paléontologie ou de la description des espèces minérales, jusqu'à celui des ensembles géomorpho-tectoniques de la terre...

4. *Les conditions climatiques de la sédimentation évaporitique.*

Une aridité importante apparaît comme la condition préalable et indispensable à la réalisation de gisements évaporitiques; condition qui ne saurait être complètement remplacée par aucun dispositif structural ou aimplement morphologique. En outre et en corollaire de cette condition, il est certain que lca grands dépôts d'évaporites ne peuvent se réaliser qu'en période de rémission d'apports détritiques. Si l'on prend l'exemple du Barrémien ou de l'Albien saharien, les cartes d'isopaques mettent en évidence d'aussi belles plates-formes que celles du Lias-Dogger inférieur — si riches en sel et en anhydrite — ou, ailleurs, une subsidence différentielle presque aussi frappante que celle du Salifère principal; mais on conçoit aisément qu'*aucun sel n'ait pu précipiter dès lors que des apports d'eaux continentales très chargées, repoussant toute influence marine, venaient saturer par leur sédimentation, au fur et à mesure, la place offerte par la subsidence.* Le cas du Jurassique supérieur (Callovien-Oxfordien-Kimmeridgien) est plus complexe. Les éléments mêmes auxquels est imputée la sédimentation évaporitique du Lias-Dogger, sont réunis ici; à savoir l'extrême homogénéité de l'épaisseur; l'existence de faciès carbonatés importants dans le Nord, pouvant amener un confinement plus au Sud. Néanmoins les passées évaporitiques ne prennent qu'une importanco tout à fait minime dans le Callovien-Oxfordien-Kimmeridgien. Peut-être faut-il en rendre responsable l'insuffisance de l'aridité à cette époque, d'ailleurs plus riche que les précédentes en éléments clastiques d'exportation continentale. Bref, la logique comme l'observation de la nature actuelle veulent qu'il ne puisse y avoir dépôt d'évaporites sans hyperaridité. Ce n'est là vraisemblablement qu'une condition nécessaire, mais non suffisante. Il convient pourtant d'en tenir compte dans tout essai d'explication paléogéographique.

5. *Les conditions liées à la morphologie du plancher sédimentaire et à la subsidence.*

L'aridité la plus totale ne saurait suffire, à elle seule, à engendrer des évaporites; car le milieu marin possède une aptitude remarquable à l'homogénéisation de ses différentes parties. A l'aridité doivent donc s'ajouter des phénomènes espables de s'opposer à ce brassage du milieu marin, phénomènes qui amèneront des conditions de *confinement* dans un certain domaine. Et c'est co confinement qui permettra à l'enrichissement en sels de se poursuivre jusqu'à une éventuelle cristallisation.

a. Observations préliminaires.

Avant d'examiner quelles aont les conditions qui semblent capables de créer un tel confinement, il faut en premier lieu rappeler certaines caractéristiques du domaine saharien et ensuite préciser quelques phénomènes hydrodynamiques décrits dans la nature actuelle et dont l'application à cette sédimentation évaporitique du passé est susceptible d'être féconde.

1. *Le domaine saharien, plate-forme particulièrement typique.*

Tout d'abord, dans l'examen que nous allons faire de ces conditions de confinement, il conviendra de ne jamais perdre de vue que le domaine du Mésozoïque saharien a consisté

Source : MNHN, Paris

en une *immense plate-forme*, particulièrement caractéristique, car d'une *extrême platitude* et vraisemblablement recouverte d'une tranche d'eau le plus souvent faible ou très faible. Ces caractères peuvent être déduits de certaines observations : parmi celles-ci, je citerai l'étendue très grande couverte par certains niveaux-repères et la généralisation de certains faciès sur d'immenses superficies, malgré une brève extension verticale. Une telle platitude qui n'a probablement pas d'équivalent dans la nature actuelle, pose le problème du confinement d'une manière tout à fait particulière : nous verrons ci-dessous que la *nécessité* d'un seuil pourrait même disparaître complètement, au profit d'un schéma beaucoup plus simple.

2. *Les facteurs dynamiques du confinement.*

En second lieu, je vais donc rappeler très brièvement quelques-uns des résultats auxquels ont abouti les études synthétisées par P.C. SCRUTON. Cet auteur, en effet, a examiné les phénomènes hydrodynamiques qui se déroulent dans des zones où s'affrontent des corps d'eaux de salinités différentes, principalement dans les estuaires. Et ces résultats sont d'un grand intérêt dans l'interprétation des évaporites marines. Lorsqu'un bras de mer (estuaire ou autre) se trouve situé dans une région où l'évaporation l'emporte sur la somme des apports par précipitation et par ruissellement, on constate que la salinité augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source d'eau de mer normale. En outre, cet excès d'évaporation crée, entre la mer libre et l'estuaire, une *pente* à la surface de l'eau, pente qui amène *ipso facto* un courant d'eau de surface allant de la mer à l'estuaire (ou au bassin). Il s'y associe un courant de retour vers la mer, qui ramène des eaux denses, dont la concentration en sels a été accrue par l'évaporation. Bien entendu, pour que de hautes teneurs en sels soient atteintes dans le bassin, il faut un obstacle à la fuite des eaux profondes. Mais, alors que la plupart des auteurs n'ont considéré que des obstacles statiques, seuil ou autre barrière physique similaire, P.C. SCRUTON a mis l'accent sur plusieurs phénomènes *dynamiques : a.* il a montré en particulier que ce courant de retour, induit principalement par des différences horizontales de salinité, donc de densité [1], ne pourra se mettre en mouvement que lorsque les pressions dues à ces différences de densité dépasseront, en profondeur, la pression hydrostatique; *b.* il a rappelé un résultat démontré par les études menées sur le Mississipi : un flot important d'eau douce en surface impose une barrière dynamique à l'intrusion d'eau salée profonde, *à cause de frottement à l'interface*; *c.* enfin il y a les frottements sur le fond, accrus par des reliefs éventuels. Finalement dans tous les cas, un équilibre dynamique s'établit qui reste sous la dépendance de nombreux facteurs dont les variations de température, du niveau de la mer, de la direction et de la force des vents, etc. Cet équilibre a pour conséquence l'établissement du gradient de salinité horizontale signalé ci-dessus et dont la position est relativement stable : l'eau de surface qui pénètre dans le bassin se concentre par évaporation, tandis qu'elle s'écoule vers la partie distale du

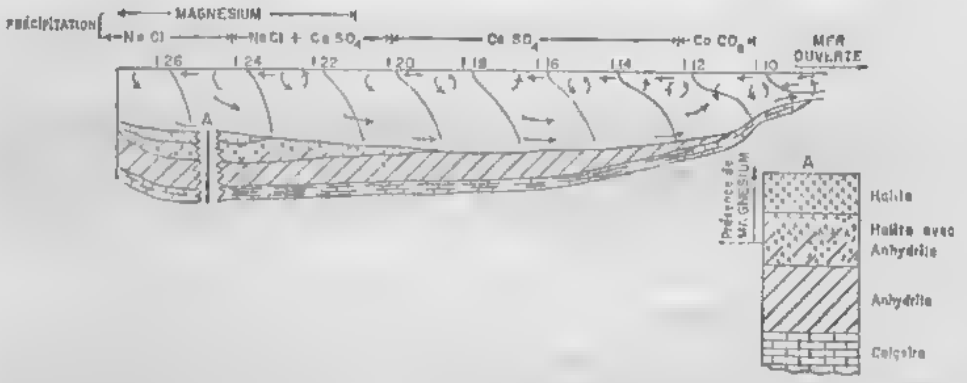


FIG. 12. — Coupe longitudinale à travers un bassin d'évaporation montrant la ségrégation horizontale des zones de dépôt et la succession stratigraphique développée au fur et à mesure d'un accroissement régulier de la salinité du bassin. Les flèches indiquent les directions de courant et les contours correspondent aux lignes d'égale densité. D'après P.C. SCRUTON (1953, fig. 5, p. 2505).

1. Ces différences de densité horizontales ont pour résultat que les surfaces de même pression, en profondeur, sont inclinées vers l'entrée du bassin.

Source : MNHN, Paris

bassin. Finalement, les concentrations élevées qui sont atteintes permettent la cristallisation des sels, les sels les plus solubles se déposant le plus loin de la mer ouverte. En cas de déplacement de l'équilibre (variations saisonnières ou prolongées dans les pluies, ou variations de température, ou du niveau de la mer, ou du régime des vents), le gradient de salinité subit une translation horizontale, et consécutivement la zone de dépôt de chaque sel se déplace également ; ainsi s'explique la succession de sels différents s'observant sur une même verticale. Cette synthèse cohérente, qui met en valeur l'importance des facteurs dynamiques, est d'un intérêt particulier pour l'interprétation d'une sédimentation de plate-forme.

On sait que G. RICHTER-BERNBURG (1955) par exemple, avait imaginé la concentration des sels *sur une plate-forme*, en l'absence de toute barre ou autre obstacle physique, suivant un schéma qu'il nommait *Saturations-Schelf*. Mais O. BRAITSCH (1962) refusait toute réalité à de tels mécanismes, arguant du fait que le reflux des solutions concentrées interdit formellement toute élévation de la concentration, en l'absence d'une barre ou d'un seuil. Les obstacles dynamiques sur lesquels P.C. SCRUTON a mis l'accent peuvent rendre compte de cette élévation de la concentration, en dehors de tout obstacle physique. Car, si les phénomènes hydrodynamiques auxquels il est fait allusion n'ont qu'une importance assez minime dans la nature actuelle, il est évident que ces mêmes phénomènes se sont trouvés considérablement amplifiés quand ils s'exerçaient sur une plate-forme d'une immensité et d'une platitude littéralement extraordinaires par rapport aux conditions présentes.

b. LE CONFINEMENT SUR LA PLATE-FORME SAHARIENNE.

Voyons donc, après ces considérations préalables, les conditions qui ont été susceptibles de favoriser un confinement dans le milieu marin qui s'étendait sur la plate-forme saharienne.

1. *Le confinement par subsidence différentielle.*

Je rappelle tout d'abord que cette locution commode mais ambiguë, signifie qu'il y a individualisation de parties d'un bassin par les valeurs très différentes qu'y prend la subsidence. Par exemple, il peut y avoir subsidence nettement plus accusée de toute la partie centrale d'un bassin et enfoncement bien moindre des zones périphériques. Il est évident que si un tel phénomène s'exerce sur une plate-forme, le léger enfoncement du plancher sédimentaire qui en résultera au centre du bassin, ne sera pas pour favoriser les mouvements hydrodynamiques ; en particulier, il y aura là un facteur qui tendra à s'opposer au courant de retour, évoqué ci-dessus. Sans en revenir aux explications profondes, il peut y avoir là des conditions favorisant le confinement.

2. *Le confinement sans subsidence différentielle prononcée.*

Le plus souvent, en fait, un rôle essentiel ne peut être dévolu à la subsidence différentielle : on constate simplement une ségrégation des sels, si grandiose qu'elle peut être qualifiée de géographique et par l'effet de laquelle les sels se classent des moins solubles aux plus solubles, en s'éloignant de la mer libre. C'est le cas de nombreux intervalles, par exemple, au sommet du Salifère principal, l'intervalle B-*a*2 [1] ; ou encore le Lias-Dogger dans son ensemble. Rappelons brièvement les caractéristiques de ces intervalles par rapport aux phénomènes de confinement.

---

1. Dans la description que je viens de rédiger des séries mésozoïques du Sahara algéro-tunisien, j'ai défini ou redéfini un certain nombre de séries (G. BUSSON, sous presse). Au-dessus du Trias gréseux débute une série salifère importante qui se poursuit plus ou moins tardivement dans la série secondaire, suivant les provinces géographiques considérées. Nettement plus haut, un repère carbonaté ou argilo-carbonaté interrompt cette série salifère ou la coiffe : c'est l'horizon B, d'extension très générale et qui est attribué assez dubitativement au Lias, peut-être à la partie basale de ce système. *J'ai nommé Salifère principal toute la masse ainsi comprise entre le Trias détritique et l'horizon B.*

En outre l'existence de repères d'importance secondaire, à savoir le niveau *d*2 dans le bas de la série (dolomitique dans le Nord, argileux ailleurs), et le niveau o2 dans la partie supérieure (niveau argileux) m'ont permis de scinder ce Salifère principal en trois unités successives qui ont été étudiées et décrites distinctement : 1. les évaporites infra-*d*2; 2. l'intervalle a2-*d*2; 3. l'intervalle B-*o*2. C'est de l'unité supérieure dont il va être question ici.

Source : MNHN, Paris

L'intervalle B-a2 a été cartographié ci-joint (planche I). Les épaisseurs sont exprimées par des courbes isopaques en noir, la composition lithologique en chaque point par des surcharges rouges. On voit que l'intervalle B-a2 ne manifeste qu'un accroissement régulier et progressif de la subsidence. Il n'y a pas individualisation de fosses réellement profondes; ce que j'ai appelé « fosse de Dorbane », et celle du Gassi-Touil qui la prolonge, ne correspondant qu'à l'emplacement des épaisseurs maximales. Par ailleurs, les courbes individualisent un « glacis atlasique » en direction du Nord-Ouest : on peut évidemment supposer qu'il y a là l'infrastructure d'un seuil ou d'une barre dont l'arête faîtière serait située un peu plus au Nord-Ouest et qui aurait séparé le bassin atlasique mésogéen d'un bassin saharien confiné ; c'est dès lors le schéma de C. OCHSENIUS qui se trouverait réalisé. Je répondrai à une telle hypothèse que rien ne prouve l'existence de ce seuil et que, de toute façon, *la direction des zones isopiques est parfaitement oblique par rapport au glacis nord-saharien ;* il est donc peu probable que l'un ait induit les autres. D'ailleurs, au Nord de la fosse de Dorbane, le bassin s'ouvre sans restriction en direction de la Berbérie.

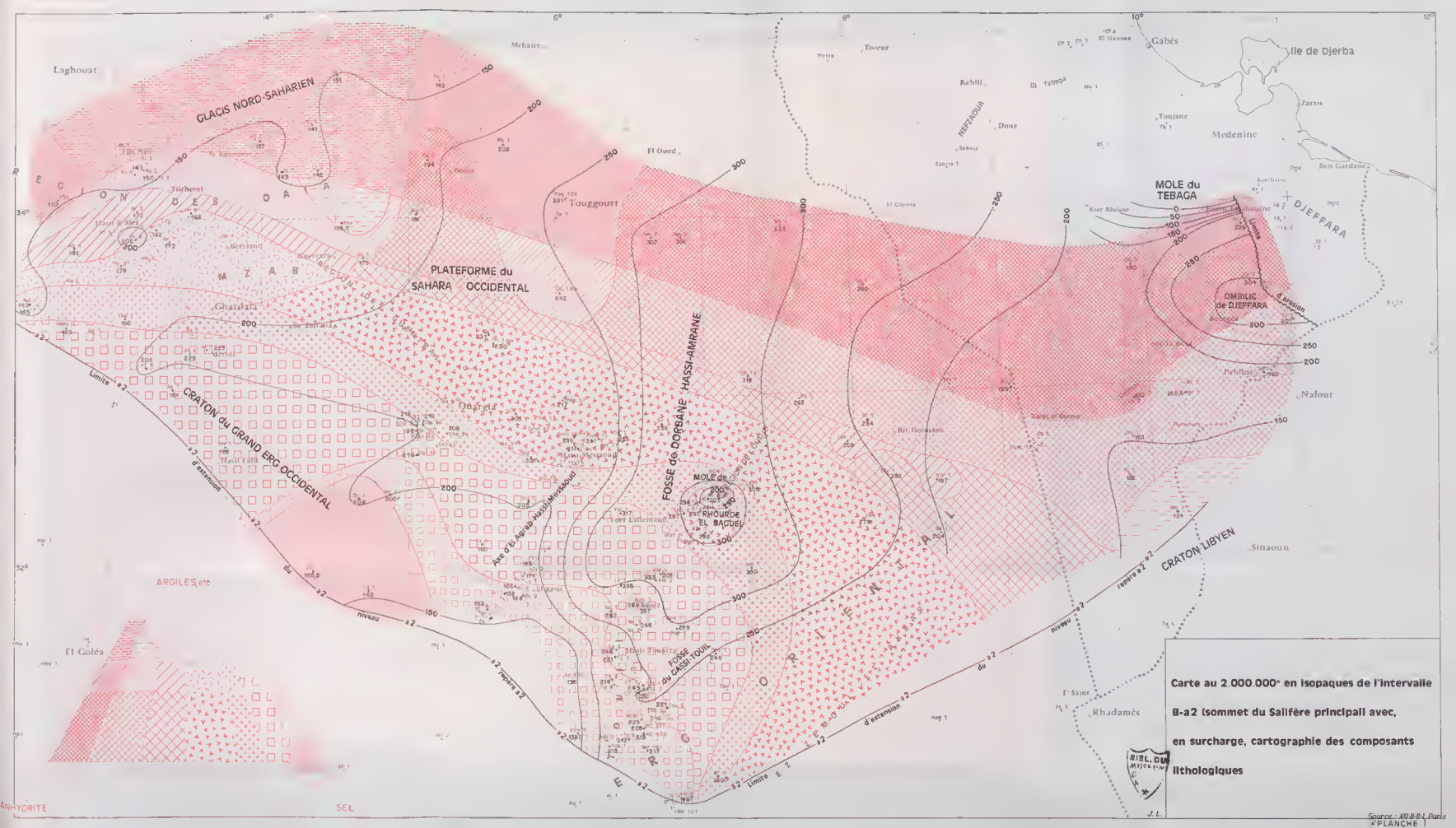
S'il est difficile de se prononcer à propos de ce qui se passe sur les confins atlasiques — puisque ces régions n'ont pas été forées — par contre l'évolution des faciès sur la plate-forme saharienne est parfaitement connue et cartographiée; or elle ne confirme nullement l'hypothèse de l'intervention d'obstacle physique dans la ségrégation de sels. Il est frappant que la carte en isopaques (courbes en noir sur la planche I) ne montre pas la moindre zone résistante qui séparerait les différentes zones isopiques. De même les coupes du Salifère (G. BUSSON, sous presse), rendues si précises par l'abondance des niveaux repères marqués par la colonne lithologique ou les diagraphies, ne manifestent *rien* sur la plate-forme saharienne qui puisse être mis en relation avec cette séparation des zones à anhydrite et des zones à sel gemme. Enfin, j'insiste sur le caractère tout à fait progressif de cette ségrégation, parfaitement mis en évidence par les pourcentages qui ont permis de dessiner la carte ci-jointe. Or une telle ségrégation progressive ne saurait s'interpréter par l'action d'un obstacle physique, lequel serait étroitement localisé. La genèse d'une telle ségrégation réside dans l'établissement de gradients de salinité, qui se sont développés sur le domaine saharien entre d'une part les confins mésogéens et, d'autre part, la partie distale — par rapport à la mer ouverte. Ces gradients ont dû prendre leur source dans des phénomènes hydrodynamiques analogues à ceux rappelés ci-dessus, mais d'une ampleur extraordinaire étant donné l'immensité de la plate-forme qui en était l'objet.

Est-ce que la carte (planche II) du Lias-Dogger inférieur [1] suggère des conclusions différentes ? Les isopaques ne montrent, ici encore, que des variations relativement faibles et très progressives. La mention d'un seuil Nord-sabarien pourrait tendre à nous ramener au schéma d'OCHSENIUS : en réalité, il ne s'agit que d'une zone où la subsidence a pris une valeur légèrement inférieure; et en outre, d'une région nettement délimitée, ne constituant pas le moins du monde une barre isolant le domaine saharien de la Berbéric. D'ailleurs, la fosse du bas Sahara semble s'ouvrir largement vers le Nord. Après les isopaques, voyons les faciès. Une observation surtout est intéressante : une région à carbonates prédominants (région de Berriane et Ald 1) s'interpose entre des faciès marins francs au Nord et des faciès évaporitiques au Sud. Une telle disposition évoque évidemment celle réalisée si fréquemment à la péripbérie des gisements d'évaporites où le facteur de confinement a été constitué par une barrière récifale ou du moins des édifices carbonatés. Sans nier complètement le rôle de ces zones carbonatées dans la genèse des évaporites du Lias-Dogger inférieur, je crois qu'il n'y a là qu'un des facteurs parmi ceux qui ont joué. *L'essentiel se trouve vraisemblablement dans le fait que la tranche d'eau recouvrant l'immense plate-forme saharienne constituait un merveilleux appareil évaporatoire et réunissait à la fois par ces caractères mêmes de plate-forme, toutes les conditions susceptibles de s'opposer à un brassage avec la mer ouverte.* D'où les gradients de salinité allant jusqu'au dépôt du sel prédominant dans la portion du bassin en position distale par rapport à la mer ouverte.

---

1. Le Lias-Dogger inférieur décrit sur la planche II, ci-jointe, se définit comme suit sur la plate-forme saharienne. La base de l'unité est placée conventionnellement au mur de l'horizon B : c'est-à-dire (*cf.* 1, p. 163) qu'il peut déjà y avoir du Lias dans l'intervalle sous-jacent ou « Salifère principal ». Quant à la limite supérieure, elle est constituée par un repère J qui se situerait vers la base du Bathonien (cf. G. BUSSON, sous presse). A titre d'exemple, cette unité correspond aux gypses de la Mestaoua (Lias à Bathonien) du Sud-tunisien, au-dessus des calcaires de Zmilet Haber (horizon B) et au-dessous des calcaires de Krachoua (Bathonien).

Source : MNHN, Paris



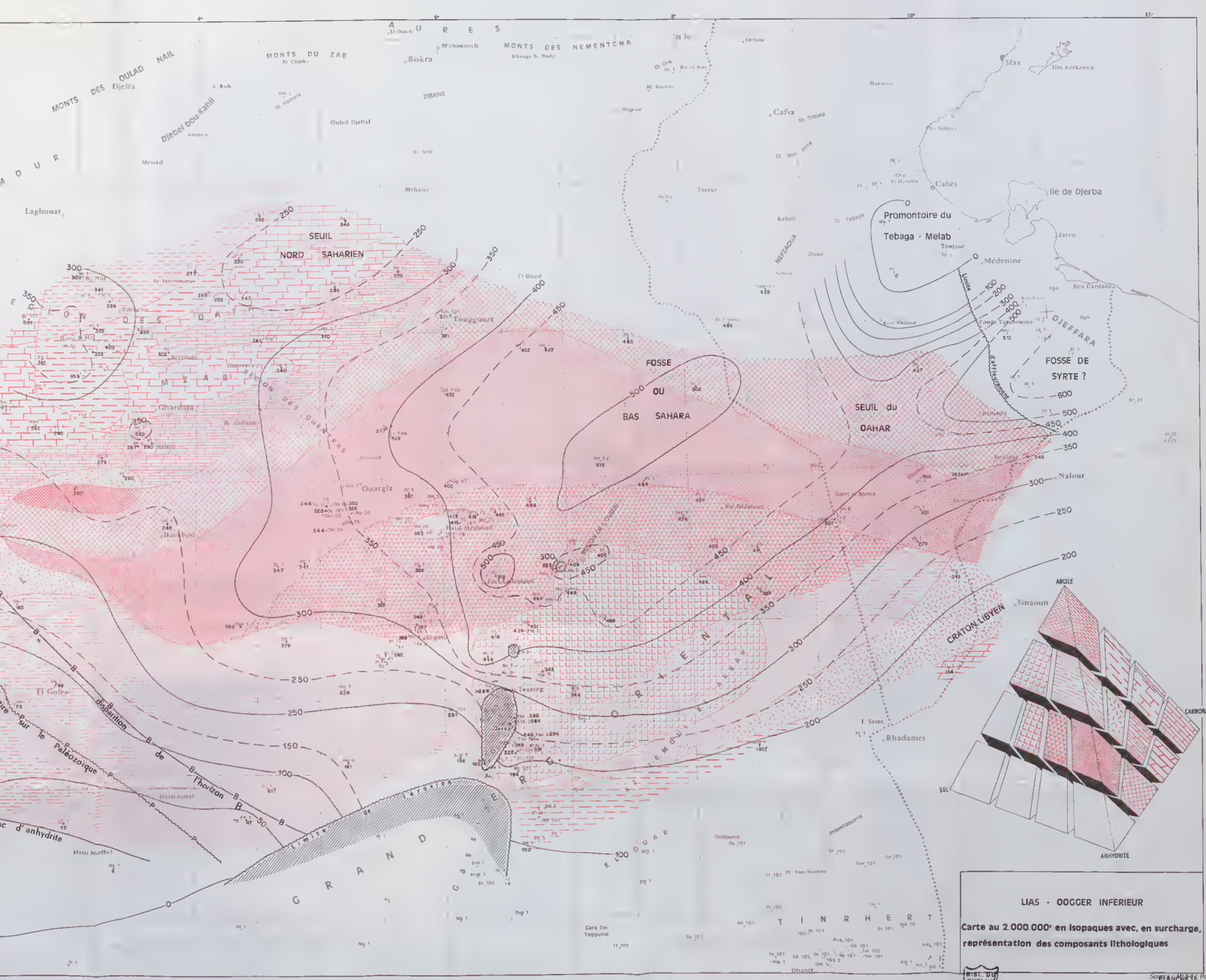
Carte au 2.000.000e en isopaques de l'intervalle B-a2 (sommet du Salifère principal) avec, en surcharge, cartographie des composants lithologiques

BIBL. DU MUSEUM

J.L.

Source : MNHN, Paris
*PLANCHE I

SEUIL
NORD SAHARIEN
Tlemcen
Ouida
Telagh
Saida
MONTS DE DAIA
MONTS DES OULAD NAIL
Djebel bou-Kahil
MONTS DU ZAB
Biskra
MONTS DES NEMENTCHA
ZIBANE
Ouled Djellal
Mesrad
Laghouat
Geryville
Mecheria
Brezina
Ain Sefra
Ksour
Djebel Amour
Plateaux
Hauts
Monts des
Ghardaia
Touggourt
Ouargla
Hassi Messaoud
Hassi R'Mel
Colomb Béchar
Jebel Grouz
Kenadsa
Ben Zireg
Tarhit
Beni Abbès
Timimoun
Grand Erg Occidental
Grand Erg Oriental
Dépression des Chotts
Dépression des Ouargla
Dépression des Guerguebs
Hamada de Tadmaït
Hamada de Tinrhert
Hamada de Tinghert
Disparition du sol triasique
Disparition des argiles triasiques lagunaires sur le Paléozoïque
Disparition de l'horizon B
Passage à un banc d'anhydrite
Limite
Source : MNHN, Paris



LIAS - DOGGER INFERIEUR

Carte au 2.000.000e en isopaques avec, en surcharge, représentation des composants lithologiques

Hist. du Muséum

Soc. Nat. Elf Paris
PLANCHE IV

Source : MNHN, Paris

3. *Conclusions.*

Ainsi, sans nier radicalement le rôle de zones à tendance ascendante situées à la bordure de la plate-forme saharienne (glacis ou seuil Nord-saharien, môle du Tebaga, etc.), ou le rôle d'édifices esrbonatés qui se sont développés dans la même région, je pense qu'il y a d'autres processus à l'origine du confinement et de la sédimentation évaporitique saharienne. La *ségrégation des différents sels* s'est établie en général sans relation avec les valeurs de la subsidence; *elle n'apparait liée qu'à la proximité ou à l'éloignement du réservoir et de la source de ces sels que constitue la masse océanique ouverte* (régions mésogéennes). La parfaite progressivité de cette ségrégation contribue à éliminer l'hypotbèse d'obstacle pbysiques; elle ne semble compatible qu'avec les gradients de salinité qui s'établissent sous l'action de facteurs dynamiques. Grâce à l'immensité de la plate-forme saharienne, le jeu de la pression hydrostatique, des frottements d'interface ou des frottements sur le fond devaient finir par constituer des obstacles quasi infranchissables aux courants de retour, qui auraient seuls évité une élévation de la concentration en sels. Dans ces conditions, les esux se salaient de plus en plus au fur et à mesure qu'elles cbeminaient sur cette plate-forme, appelées par le vide que créait sans cesse l'évaporatiou; les données physico-chimiques nous apprennent que, au cours de cette concentration, le gypse précipitait dans un intervalle de concentration allant du double à vingt fois, le sel gemme, de vingt à soixante-trois fois.

Arrivé à ce point de mon développement, une question finit par se poser. Sur une plate-forme constituant avec tant d'excellence un champ de dépôt d'évaporites, pourquoi cette sédimentation évaporitique — largement prédominante du Trias au Dogger — a-t-elle cessé au cours du Bathonien ? Question d'autant plus naturelle que le cadre semble à peu près le même, par exemple au Callovien-Oxfordien-Kimmeridgien; avec une répartition à peu près identique de la subsidence, avec les mêmes masses carbonatées dans le Nord, les mêmes caractères de plate-forme, et, apparemment, toujours nne tranche d'eau assez peu épaisse [1]. A vrai dire, il est assez difficile de répondre à cette interrogation. Constatons d'abord que les évaporites, en général, n'ont pas disparu complètement. Elles sont seulement moins abondantes. Mais elles restent représentées, en particulier dans la province centrale, lieu d'élection du confinement, aussi bien au Jurassique supérieur que dans une grande partie du Crétacé. Par ailleurs, aux périodes d'apports détritiques généralisés, la disparition d'évaporites ne surprend pas : le dépôt de sels étant formellement incompatible avec les masses d'eaux charriant ces éléments clastiques. Bref un changement de climat, allant dans le sens d'une moindre aridité, dans le sens d'une somme de ruissellement et précipitations supérieure à l'évaporation, rend compte de la disparition des évaporites ou de leur raréfaction. Mais des changements climatiques suffisent-ils à expliquer tous les cas ? Comment se fait-il qu'au Cénnmanien supérieur ou au Turonien la mer si peu profonde qui recouvrait la plate-forme saharienne, a déposé partout des calcaires coquilliers puis des dolomies, mais jamais de sulfates ou de chlorures en quantité notable. Quel facteur, insaisissable pour nous, a joué : légère augmentation relative de la profondeur générale en relation avec le nivesu des mers, climat moins aride ne favorisant plus l'évaporatiou; chimisme des océans légèrement modifié ? Reconnaissons que l'on en est entièrement réduit aux bypothèses.

H. CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

La sédimentation des évaporites pose une multitude de points d'interrogation et offre une infinité de problèmes. J'ai rappelé ci-dessus, à titre d'exemple, que pendant deux siècles les études les plus minutieuses menées par tant d'auteurs sur le gypse parisien ont abouti à un désaccord chronique et totsl entre les tenants de l'origine marine et ceux d'une genèse continentale ou dulcaquicole. Fait significatif, ici même, le lecteur aura peut-être l'impression un peu

1. Cette permanence de conditions morphologiques identiques est assez relative, ainsi que me l'a fait remarquer R. Laffitte. Si la plate-forme triasique s'étendait sur le Sahara et la Berbérie, au Jurassique au contraire l'individualisation de grandes fosses de subsidence en Berbérie modifie la morphologie générale. Cette diminution de l'étendue de la plate-forme peut contribuer à un moindre confinement.

Source : MNHN, Paris

désagréable de ne pouvoir définir, au terme de ces quelques pages, si l'auteur est finalement partisan de l'origine profonde des évaporites ou d'une cristallisation au voisinage de l'émersion.. Je vois dans ces incertitudes, dans ces contradictions, l'extrême difficulté qu'il y a pour nous à interpréter ces dépôts et j'en crois déceler la raison dans les différences profondes qui séparent, et qui opposent même, la physionomie du *monde anté-alpin* à notre géographie actuelle, unique source de nos connaissances et seule réserve où vient puiser notre imagination.

Sans évoquer à nouveau ici le choix à faire entre le milieu de dépôt marin ou continental, ni les phénomènes de précipitation interstitielle, sans revenir sur les notions et les observations, sur les raisonnements et les expériences qui sont à l'origine des théories profondes et superficielles de la cristallisation des sels, j'essaierai de conclure seulement sur l'apport de ces données sahariennes.

Tout d'abord, la considération de phénomènes locaux semble inciter à accorder une importance primordiale aux subsidences différentielles dans l'élaboration des couches évaporitiques. Et cette constatation aurait pour corollaire d'admettre la possibilité d'une profondeur de dépôt plus grande pour les sels évaporitiques que pour les carbonates ou les argiles auxquels ces sels passent latéralement; mais peut-être d'ailleurs, *seulement à peine plus grande*. En outre, cette même constatation met l'accent sur l'importance de la forme du plancher sédimentaire dans la ségrégation des différents dépôts. Je crois que les évaporites sahariennes ne permettent pas d'en dire plus. En particulier, elles ne permettent pas le moins du monde de prendre parti sur les hypothèses passionnantes de G. RICHTER-BERNBURG et d'autres auteurs, hypothèses selon lesquelles la vitesse de sédimentation des sels est tellement supérieure aux vitesses de subsidence admissibles que l'aire de dépôt devait préexister comme *fosse*, entièrement creusée, avant le début de la sédimentation : affirmation qui représente le meilleur type des interprétations profondes. Elles ne permettent pas non plus de juger, sinon de la validité, du moins des possibilités d'application à ces séries anciennes, des théories et expériences dites «dynamiques-polythermales» qui suggèrent, de leur côté, une sédimentation profonde des évaporites.

Mais l'étude complète du Mésozoïque saharien — rendue si précise par l'absence quasi totale de déformations tectoniques et si complète par la densité du réseau de sondages profonds, suivie par les méthodes les plus modernes — vient reléguer petit à petit les phénomènes liés à la subsidence différentielle à un rang relativement secondaire. Et, au contraire, ce qui paraît de plus en plus frappant, c'est, sur une plate-forme à peu près parfaite, la *ségrégation des sels dans l'ordre de solubilité croissante, en position d'éloignement également croissante par rapport à la mer ouverte;* tout simplement. Je crois que ces phénomènes d'une simplicité grandiose appellent une interprétation qui ne prenne pas en considération que des points de détail ou des accidents locaux; parmi ceux-ci, certes, l'existence d'un seuil nord-saharien, ou d'un promontoire du Tebaga, viennent évoquer les seuils tectoniques invoqués par tant d'auteurs; la présence d'un pôle carbonaté dans la partie septentrionale du Sahara pourrait permettre d'envisager le rôle d'une barrière subrécifale. Mais il m'a semblé que les phénomènes à invoquer ne devaient pas négliger le principal, qui est le caractère de plate-forme de ce Sahara à l'ère secondaire, caractère auquel devait s'ajouter l'action permanente d'une aridité indéniable. Et j'ai donc cherché à établir le caractère secondaire des conditions bathymétriques; celles-ci pouvant se répercuter sur le *confinement*, mais n'en représentant pas le facteur le plus important. Tandis que des facteurs dynamiques, discrets dans la nature actuelle mais qui y sont néanmoins connus, semblent avoir pu s'exercer avec une ampleur démesurée dans une sédimentation de plate-forme dont la taille a été réellement extraordinaire.

Source : MNHN, Paris

BIBLIOGRAPHIE

Auboin J., Brousse R. et Lehman J.P. (1968). Précis de Géologie, 1er cycle et licence, tome I, Pétrologie, 1 vol., 712 p., 402 fig. Paris (Dunod).

Avias J. (1953). Sur la formation actuelle de gypse dans certains marais côtiers de la Nouvelle-Calédonie. *C.R. XIXe Congr. géol. inter.*, sect. IV, 4, Topographie sous-marine et sédimentation actuelle, p. 7-9, 1 fig. Alger.

Bellair P.

(1954). Sur l'origine des dépôts de SO4Ca actuels et anciens. *C.R. Acad. Sci.*, **239**, p. 1059-1061. Paris.

(1958). La sédimentation et la sélection différentielle des Évaporites. *Ve Congr. Int. Séd. Eclog. géol. Helv.*, **51**, 3, p. 495-500, 3 fig. Bâle.

Bonte A. (1953). Sur la genèse des quartz bipyramidés. *C.R. som. Soc. Géol. Fr.*, p. 253-254. Paris.

Borchert H. et Muir R.O.

(1964). Salt deposits. The origin, Metamorphism and deformation of Evaporites, 1 vol., 338 p., fig. Londres (D. Van Nostrand Cy).

(1965). Principles of Oceanic salt deposition and metamorphism. *Chemical Oceanography*, **2**, p. 205-276, 19 fig. Londres, New York (Academic Press, J.P. Riley et G. Skirrow, éd.).

Brattsch O. (1962). Entstehung und Stoffbestand der Salzlager-statten, 1 vol. Berlin, Göttingen, Heidelberg (Springer-Verlag).

Branson E.B. (1915). Origin of thick gypsum and salt deposits. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **26**, p. 231-242. New York - Baltimore.

Brewer P.G., Riley J.P. et Culkin F. (1965). The Chemical Composition of the hot salty water from the bottom of the Red Sea. *Deep Sea Res.*, **12**, p. 497-503, 5 tabl. Oxford (Pergamon Press Ltd.).

Burollet P.F. (1956). Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie centrale, Thèses Alger 1958. *Ann. Mines et Géol.*, 18, p. 1-345, 93 fig., 22 pl. Tunis.

Busson G.

(1960). Sur la coupe du Crétacé supérieur et de l'Éocène inférieur du Tinrhert central (Sahara algérien). *Trav. Inst. Rech. Sahar.*, **19**, p. 141-149, 1 carte, 4 pl., photo. Alger.

(1964). Carte géologique de l'Algérie au 1/500 000, Feuille Fort-Flatters. *Publ. C.R.Z.A.* Paris (C.N.R.S.).

(1967). Le Mésozoïque saharien, 1re partie : l'Extrême-Sud tunisien, 1 vol., 194 p., 18 fig., 7 pl. h. t. *Publ. C.R.Z.A.*, Géologie. Paris (C.N.R.S.).

(à paraître). Le Mésozoïque saharien, 2e partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. *Publ. C.R.Z.A.*, Géologie. Paris (C.N.R.S.).

Cordini R. (1967). Reservas salinas de Argentina. *Ann. Inst. Nat. Geol. y Miner.*, 13, 108 p., 38 fig. Buenos Aires.

Dalbiez F. (1963). Note sur le Trias nord-aquitain, Colloque sur le Trias, Montpellier 1961. *Mém. B.R.G.M.*, **15**, p. 344-348, 3 fig. Paris.

Deicha G.

(1942). Microstratification chimique et physique dans le Ludien et le Sannoisien du bassin de Paris (présentation d'échantillons). *C.R. som. Soc. géol. Fr.*, p. 123-124. Paris.

(1943). Réduction des masses inférieures du gypse vers l'Ouest du bassin tertiaire parisien. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (5), **13**, p. 395-402. Paris.

(1943). Les conséquences de l'interprétation erronée des travaux de Van't Hoff sur le gypse et l'anhydrite marins. *C.R. som. Soc. géol. Fr.*, p. 144-146. Paris.

(1944). La vitesse de sédimentation chimique salifère et les chiffres d'évaporation annuelle. *C.R. som. Soc. géol. Fr.*, p. 140-142. Paris.

Deleau P. (1952). La région de Colomb-Béchar. *XIXe Congr. géol. Int., Monogr. région.* (1), Algérie, p.8-101, 6 fig. Alger.

Dussart B. (1963). Dépôts salifères anciens et géologie de l'Actuel. *Rev. Géogr. phys. Géol. dynam.*, **5** (1962), 1, p. 55-59. Paris.

Source : MNHN, Paris

Dzens-Litovskij A.I. (1956). Le Kara-Bogaz-Gol dans le passé géologique et actuellement. *Dokl. Ezhegod. Chten. Pal. L.S. Berga, S.S.S.R.*, 1-3 (1952-54), p. 131-160, 7 fig., 1 tableau. [Traduction Serv. Inf. géol. (B.R.G.M.), n° 2044]. Paris.

Emberger J. (1960). Esquisse géologique de la partie orientale des monts des Oulad-Naïl (Atlas saharien, Algérie). *Publ. Serv. Carte géol. Algérie*, **27**, 399 p., 87 fig., 17 pl. Alger.

Erhart H. (1956). La genèse des sols en tant que phénomène géologique, 1 vol., 90 p. Paris (Masson & Cie).

Fabre J. (1961). La genèse du gypse viséen de Tindouf (Sahara nord-occcidental) dans la perspective de L.L. Sloss. C.R. Som. Soc. géol. Fr., p. 9-11, Paris.

Fairbridge R.W. (1966). The Encyclopedia of Oceanography. Encyclopedia of Earth Sciences series, volume I, 1021 p., fig. New York (Rheinold Publish Corp.).

Finaton Ch. (1934). Les dépôts lagunaires et le gypse du bassin parisien. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, **7**, p. 357-378, 3 fig. Paris.

Flandrin J. (1948). Contribution à l'étude stratigraphique du Nummulitique algérien. *Bull. Serv. Carte géol. Algérie*, (2), **19**, p. 1-335, 90 fig., 8 pl. h. t. Alger.

Fontes J.C. de, Gonfiantini R. et Tongiorgi E.
(1963). Composition isotopique et origine de la série évaporitique du bassin de Paris. *C.R. som. Soc. géol. Fr.*, p. 92-94, 1 fig. Paris.
(1966). Intérêt en géologie d'une étude isotopique de l'évaporation. Cas de l'eau de mer. *C.R. Acad. Sci.*, **263**, p. 1950-1953, 1 fig. Paris.
(1968). Le gypse du bassin de Paris. Historique et données récentes. Colloque sur l'Éocène, Paris, 1968. *Mém. B.R.G.M.*, 58, p. 359-386, 5 fig. Paris.

Fourmarier P. (1949). Principes de géologie, vol. 1, 626 p., 398 fig. Paris (Masson).

Fristrup Borge (1953). High artic deserts. *XIX^e Congr. géol. int., C.R. Session VII*, p. 92-99, 2 pl. Alger.

Gibson G.W. (1962). Geological Investigations in southern Victoria Land, Antarctica. Part. 8. Evaporite salts in the Victoria Valley region. *N. Zealand J. Geol., géophys.*, **5**, 3, p. 361-374, 10 fig. Wellington.

Gignoux M. (1960). Géologie stratigraphique, 1 vol., 760 p., 155 fig. Paris (Masson, 5e édit.).

Grabau Ch. (1920). Geology of the non-metallic mineral deposits other than silicates. VI. Principles of salts deposits, 1 vol., 435 p., New York (Mac Graw Hill).

Hatch F. H., Rastall R. H., Black M. (1938). The petrology of the Sedimentary rocks. 1 vol. 383 p., 75 fig., 16 tabl. Londres (Th. Murby & Co).

Hirtz P. (1965). Les bassins salifères du Gabon et du Congo (Brazzaville). *A.F.T.P.* Congrès du Touquet, 1965, 2, p. 5-19, 14 fig. Paris.

Lapfitte R. (1947). Faciès, épaisseur des sédiments et paléogéographie dans le Bas-Sahara pendant les temps secondaires. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (5), **17**, p. 213-216, 2 fig. Paris.

Lartet L. (1869). Essai sur la géologie de la Palestine et des contrées avoisinantes, Bibliothèque de l'école des Hautes Études, Section des Sciences naturelles, **2**, Paris (V. Masson et ses fils).

Launay de L. (1913). Traité de Métallogénie, Gîtes minéraux et métallifères, t. I, 855 p., 129 fig. Paris (Librairie Polytechnique Ch. Béranger).

Laurentiaux-Vieira F. et Laurentiaux D. (1963). Réflexions sur la paléontologie du Trias et sa signification, Colloque sur le Trias, Montpellier, 1961. *Mém. B.R.G.M.*, **15**, p. 501-506, Paris.

Lecointre G. (1960). Observation au sujet de la note de M. Ricour sur la genèse des niveaux salifères. *C.R. som. Soc. géol. Fr.*, p. 137. Paris.

Logan B. N. (1961). Cryptozoon and associate atromatolites from the recent, Shark Bay, Western Australia. *J. Géol.*, **69**, 5, p. 517-533, 3 fig., 2 pl. Chicago.

Lombard A. (1956). Géologie sédimentaire. Les séries marines, 1 vol. 723 p., 180 fig., 13 pl. h. t. Paris (Masson).

Millot G. (1964). Géologie des argiles, 1 vol., 499 p., 75 fig. Paris (Masson).

Morris R. C. et Dickey P. A. (1957). Modern evaporite deposition in Peru. *Bull. A.A.P.G.*, **41**, 11, p. 2467-2474, 2 fig. Tulsa.

Nelson K. H. et Thompson T. G. (1954). Deposition of salt from water by frigid concentration. *J. Mar. Res.*, **13**, p. 166-182.

Neev D. et Emery K. O. (1967). The Dead Sea, Depositional processes and environment of evaporites. *Geol. Surv.*, 41, p. 1-147, 59 fig., 50 tabl. Jérusalem.

Source : MNHN, Paris

NEUMANN A. C. et MC GILL D. A.
(1962). Circulation of tho Red Sea in early summer. *Deep-Sea Res.*, 8, p. 223-235, 7 fig. Oxford (Pergamon Press Ltd.).
et CHAVE K. E. 1(965). Connate Origin proposed for hot salty bottom water from a Red Sea Basin. *Nature.* **206**, p. 1346-1367, 1 fig. Londres.

OCHSENIUS C. (1877). Die Bildung der Steinsalzlager und ihrer Mutterlangen-salze. C.E.M. Pfeffer, 1 vol. 172 p. Halle.

PANNEKOEK A. J. (1965). Shallow-water and deep-water evaporite deposition. *Ann. Journ. Sci.*, **263**, p. 284-285. New Haven.

PANKEN J. M. (1967). Salt solution and subsidence structure, Wyoming, North Dakota and Montana. *Bull. A.A.P.G.*, **51**, 10, p. 1929-1947, 14 fig. Tulsa.

PERRODON A.
(1957). Étude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. *Publ. Serv. Carte géol. Algérie* (Nouvelle Série), 12, 328 p., 11 fig., 4 pl. h. t., 8 pl. photos. Alger.
(1968). Esquisse d'uno géologio dynamique des bassins sédimentaires. Rapport DE — DGC — D.30 n° 8-1780, 18 p., 10 fig. Paris (inédit).
(1968). Introduction à la géologie des évaporites. Rapport D. 30 p. N° 8-1773. Elf R.E. AP/bt. Paris (inédit).

PLATT L. B. (1962). The Rann of Cutch. *J. Sediment. Petrol.*, **32**, 1, p. 92-98, 1 fig. Tulsa.

POMEROL Ch. ot FEUGUEUR L. (1968). Guides géologiques régionaux, Bassin de Paris-Ile-de-France, 1 vol., 174 p., 82 fig., 16 pl. Paris (Masson et Cie).

RICHTER-BERNBURG G. (1953). Uber salinare Sedimentation. *Z. dtsch. geol. Ges.*, **105**, p. 593-645, 30 fig. Hannovre.

RICOUR J.
(1962). Contribution à une révision du Trias français. *Mém. Serv. Carte géol. Fr.*, 1 vol. 471 p., 24 pl., 8 pl. h. t. Paris.
(1963). Problèmes stratigraphiques et caractères du Trias français. Colloque sur le Trias, Montpellier, 1961. *Mém. B.R.G.M.*, **15**, p. 19-28, 1 fig., 1 tabl. Paris.
(1964). La genèse des nivesux salifères. Cas du Triss français. *Association Sédiment. Français*, Groupo E. C.R. réunion p. 3-19 (inédit).

RILEY J. P. (1967). The hot saline waters of the red sea bottom and their related sediments. *Oceanogr. and Marine Biology. Ann. Review*, 5, p. 141-157. Londres (Barnes édit.).

SABROT-REYNAUD J. (1963). Trias du dôme de la Mure et des régions annexes. Colloque sur le Trias, Montpellier 1961. *Mém. B.R.G.M.*, **15**, p. 249-257, 2 fig. Paris.

SCRUTON P. C. (1953). Deposition of evaporites. *Bull. A.A.P.G.*, **11**, p. 2498-2512, 4 fig., 2 tabl. Tulsa.

SHEARMAN B. Sc. (1966). Origin of marine evaporites. *Instn. Mining Metallurgy, Trans.*, Sect. B, **75**, 717, p. 208-215, 6 fig.

SLOSS L. L. (1953). The significsnce of Evaporites. *J. Sediment. Petrol.*, **23**, 3, p. 143-161, 8 fig. Tulsa.

SMITH G. J. (1965). Evaporite salts from tbe dry valleys of Victoria Land, Antarctica. *N. Zealand J. Geol. géophys.* (3, *Spec. Antartic Issue*), **8**, 2, p. 381-382. Wellington.

STEWART F. H. (1963). Marine Evaporites, *Geol. Surv. Prof. Paper* 440-y. p. 1-53, 13 fig., 33 tabl. Washington.

STRAKHOV N. M. (1967). Principles of lithogenesis, vol. 1, 245 p., 57 fig. Londres (Olivor et Boyd).

SUGDEN W. (1963). The Hydrology of the Persian Gulf and its significance in respect to evaporite deposition. *Ann. Journ. Sci.*, **261**, p. 741-755, 5 fig. New Haven.

SWALLOW J. C. ot CREASE J. (1965). Hot salty water at the bottom of tho Red Sea. *Nature*, **4967**, p. 165-166, 2 fig. Londres.

TCHERNIA P. (1959). Les Océans, *in* J. GOGUEL : *La Terre*, p. 415-437. Paris (N.R.F., La Pléiade).

USIGLIO J.
(1849). Analyse de l'eau de la Méditerranée sur les côtes de France. *Ann. Chimie et Phys.*, (3), **27**, p. 92-107. Paris.
(1849). Étude sur la composition de l'eau de la Méditerranéo et aur l'exploitation des sels qu'ello contient. *Ann. Chimie et Phys.*, (3), **27**, p. 172-191. Paris.

VINOT A. (1965). Rôle probable des processus biochimiques dans la formation du gypse parisien. *C.R. Ac. Sci.*, **261**, p. 3650-3652. Paris.

IMPRIMERIE NATIONALE. — 8 564026 6

Source : MNHN, Paris

Source · MNHN, Paris

Source : MNHN, Paris

Source · MNHN, Paris

Source · MNHN, Paris

Source · MNHN, Paris